

doi: 10.12097/gbc.2023.02.046

黄土高原关键带土壤水文过程研究进展与展望

王云强^{1,2,3}, 张少康^{1,2}, 张萍萍^{1,2,3}, 杨阳^{1,3}

WANG Yunqiang^{1,2,3}, ZHANG Shaokang^{1,2}, ZHANG Pingping^{1,2,3}, YANG Yang^{1,3}

1. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710061;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 陕西黄土高原地球关键带国家野外科学观测研究站, 陕西 西安 710061

1. *State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, Shaanxi, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *National Observation and Research Station of Earth Critical Zone on the Loess Plateau, Xi'an 710061, Shaanxi, China*

摘要: 地球关键带是 21 世纪地球科学的前沿和重点领域之一。黄土约占全球陆地面积的 10%, 中国的黄土高原是典型的地球关键带之一。土壤水文过程驱动着黄土高原关键带不同尺度的系列生物地球化学循环过程, 决定土壤-植被-大气连续体的演化方向与可持续性。基于地球关键带“4M”研究框架, 综述了黄土高原关键带土壤水文过程研究的热点与前沿, 梳理了不同尺度土壤水文过程的观测方法与技术、模型模拟与填图、深层土壤干化管理等研究进展; 在此基础上, 围绕黄土高原关键带土壤水资源优化利用与生态系统服务功能提升, 提出了全球气候变化和大规模人类活动共同影响下黄土高原关键带土壤水文过程的优化管理对策和建议, 展望了黄土高原关键带土壤水文过程研究的未来趋势。以期深化黄土高原关键带研究的科学认知, 促进地球关键带科学的发展, 为黄土高原自然资源优化管理、山水林田湖草系统治理提供科学参考。

关键词: 地球关键带; 黄土高原; 土壤水文过程; 优化管理; 生态系统服务

中图分类号: P33; S15 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)08-1346-15

Wang Y Q, Zhang S K, Zhang P P, Yang Y. Research progress and prospect of soil hydrological processes in critical zone of the Loess Plateau. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(8): 1346-1360

Abstract: The Earth Critical Zone (CZ) is one of the frontiers and key fields of earth science in the 21st century. Loess accounts for about 10% of the global land area, and the Chinese Loess Plateau (CLP) is one of the typical Loess CZs. Soil hydrological processes drive a series of biogeochemical cycles at different scales in the CLP-CZ and determine the evolution direction and sustainability of the soil-vegetation-atmosphere continuum. Based on the "4M" research framework of the CZ science, we summarized the hot spots and frontiers of soil hydrological processes in the CLP-CZ, and then reviewed the research progresses of soil hydrological processes at different scales, including the observation methods and techniques, model simulation and mapping, and deep soil drying management. Based on this, focusing on the optimal utilization of soil water resources and the improvement of ecosystem service function in the CLP-CZ, the countermeasures and suggestions for the optimal management of soil hydrological processes in the CLP-CZ under the joint impact of global climate change and intense human activities were put forward, and the future trend of soil hydrological processes in the CLP-CZ was forecasted. A good understanding of this information is helpful to deepen the scientific understanding of the CLP-CZ research, promote the development of the CZs science, and provide scientific reference for the CLP natural resources optimization and mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands ecosystems management.

Key words: Earth Critical Zone; the Loess Plateau; soil hydrological processes; optimize management; ecosystem services

收稿日期: 2023-02-21; 修订日期: 2023-06-25

资助项目: 国家自然科学基金项目《黄土高原土壤干层与水分循环的多尺度互馈机制》(批准号: 41971045)

作者简介: 王云强(1981-), 男, 研究员, 从事土壤水文过程与调控研究。E-mail: wangyq@ieccas.cn

“关键带”又称“临界带”,最早由德国物理化学家 D. E. Tsakalotos 于一个世纪前提出,指的是 2 种流体的二元混合界面 (Cleverly et al., 2016)。1962 年,美国矿物学家 E. N. Cameron 将南非一处由复杂地质构造作用形成的岩体称为关键带 (Lin, 2010)。随着地质学、地球化学和水文学的深入发展,关键带在地球科学领域被赋予了更广泛的意义。2001 年,美国国家研究委员会(NRC)在《地球科学中基础研究的机遇》一书中对“地球关键带”给出了明确的定义,即从植被冠层顶部到地下含水层底部的垂直空间区域 (Sciences, 2001),这是一个高度异质性的、人类活动能影响到的近地表区域。在这个区域中,岩石、土壤、水、空气和生物体相互作用,调控陆地自然环境,支撑生命体的可持续发展 (Amundson et al., 2007; Richter et al., 2009; Lü et al., 2019)。地球关键带涵盖各种生态系统类型,从热带到极地冰盖、从沙漠到湿地、从基岩山地到冲积三角洲。作为一个不断变化的开放系统,地球关键带不断维持着岩石与矿物质、植被与气候、土壤与生命活动等过程间的动态平衡 (Amundson et al., 2007; Chorover et al., 2007; Richter et al., 2009; Lin, 2010; Lü et al., 2019)。

黄土在世界范围内分布广泛,约占全球陆地面积的 10%。中国黄土高原是典型的黄土关键带之一,拥有世界上最大的风成黄土区 (Chen et al., 2008; Shao et al., 2018; Wang et al., 2021),面积约 $64 \times 10^4 \text{ km}^2$,

沉积厚度大都介于 30~80 m 之间;有丰富的土地资源 (Huang et al., 2006, 2011; Xiao et al., 2011)、矿产资源 (Zhen et al., 2019; Guan et al., 2020)、旅游资源和文化开发价值 (Liu et al., 2017; Sun et al., 2017; Huang et al., 2019),为中国 8.5% 的人口生存和发展提供了必要基础;还具有巨大的生态效益,是水、碳、氮、粉尘等各类物质的“源”或“汇”(Georgiou et al., 2022; Li et al., 2022; Wang et al., 2022)。但是,作为典型的生态脆弱区,黄土高原也面临着严峻的土壤侵蚀、水土流失和生态环境问题 (王云强等, 2016; Wang et al., 2022)。土壤水文过程作为各个圈层和界面之间物质能量交换的主要驱动力,是地球关键带研究的关键环节 (图 1) (Mcmillan et al., 2014)。在黄土高原,土壤水的储量、通量与时空分布特征决定了土壤-植被-大气系统的演化方向及生态系统的稳定性与可持续性 (Mccoll et al., 2017)。受季风气候、风尘堆积、地表侵蚀等因素的综合作用,黄土高原关键带土壤水文过程具有明显的时空异质性和复杂性 (Feng et al., 2016; 王云强等, 2016; Jia et al., 2020; Wang et al., 2020);近几十年来,叠加大规模人类活动的深刻影响,黄土高原关键带土壤水文过程在不同时空尺度上发生着深刻变化 (Huang et al., 2013)。科学认识黄土高原关键带土壤水文过程演变规律,是应对全球气候变化、提高生态系统稳定性、优化黄河流域自然资源管理的重要基础 (Zou et al., 2014)。

本文围绕地球关键带土壤水文研究的“4M”框

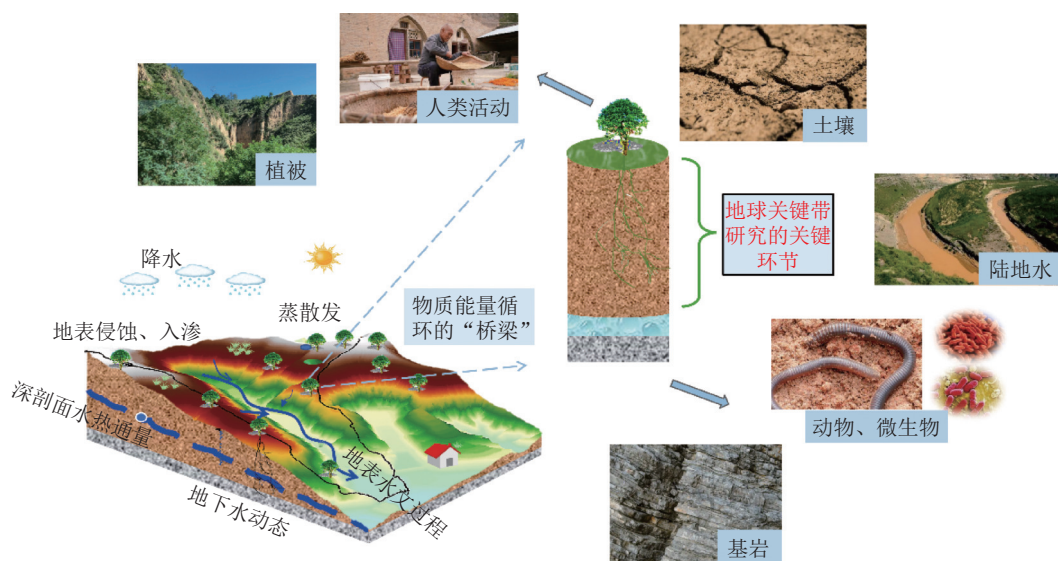


图 1 土壤水文过程在关键带研究中的关键性

Fig. 1 Critical role of soil hydrological processes in Critical Zone research

架: Mapping(填图)、Monitoring(监测)、Modeling(模拟)和 Management(管理)(Lin et al., 2015; Ma et al., 2017), 借助文献可视化工具分析了黄土高原关键带土壤水文过程研究的动态及热点变化; 梳理了黄土高原土壤水分监测、水文模型、土壤调查与填图、深层土壤水文过程与土壤干化管理等方面的研究进展; 讨论并展望了新时期黄土高原关键带土壤水资源的优化管理对策, 以期提高对黄土高原关键带土壤水文过程研究的科学认知, 为山水林田湖草一体化生态保护和修复提供科学参考, 同时为黄土高原生态屏障建设和气候-经济-社会协同发展提供理论支撑。

1 黄土高原关键带土壤水文过程研究热点

1.1 数据来源及研究方法

科研论文是最能体现科学研究成果的具体产出形式, 具有专业性、科学性、时效性、应用性和规范性的特点, 能够全面反映各学科研究热点与前沿(张宇婷等, 2020; 骆占斌等, 2022)。据此, 选取 2000—2022 年的中英文文献作为研究对象, 将中国知网(CNKI)数据库核心期刊和 Web of Science(WOS)数据库核心合集(选取 article 和 review 类型的文献)作为数据源, 以“SU % = ‘黄土高原’AND SU % = (‘土壤水文’OR ‘土壤水资源’OR ‘土壤水监测’OR ‘土壤水模型’OR ‘土壤水管理’)”为检索字段, 在 CNKI 数据库中进行检索; 以“TS = (‘The Loess Plateau’ OR ‘Chinese Loess Plateau’ OR ‘Loess Plateau Critical Zone’)AND TS = (‘Soil hydrology’ OR ‘Soil water resources’ OR ‘Soil water monitoring’ OR ‘Soil moisture monitoring’ OR ‘Soil water model’ OR ‘Soil moisture model’ OR ‘Soil water management’)”为检索字段, 在 WOS 数据库中进行检索。检索时间为 2023 年 2 月 15 日。经过筛选, 删除与主题词无关的文献, 得到中文文献 1157 篇、英文文献 5832 篇。

1.2 文献发表趋势分析

CNKI 收录的黄土高原土壤水文过程研究相关文献(图 2-a)发表情况大致可划分为 2 个阶段: ①快速发展阶段(2000—2006 年), 步入 21 世纪以来, 中国实施了多项改善民生和生态的举措, 黄土高原关键带水文过程研究迈进了全新认知阶段, 文章数量呈现出快速增加的趋势, 年均发文量为 34 篇; ②全面发展阶段(2007—2022 年), 随着可持续发展战略

的推进及生态文明建设的布局, 黄土高原关键带土壤水文过程研究进入全面深化理解时期, 该阶段年均发文量为 57 篇。其中, EI、CSCD 及北大核心收录期刊的高质量文献也呈现出类似趋势, 2000 年以来, 高质量文献共发表 817 篇, 占文献检索总量的 71%。

WOS 数据库合集显示, 关于黄土高原关键带土壤水文过程的研究成果数量在不断提高(图 2-b), 文献发表情况大致划分为 3 个阶段: 缓慢增长阶段(2000—2013 年), 年均发文量为 69 篇; 高速增长阶段(2014—2019 年), 年均发文量为 406 篇; 逐步稳定阶段(2020—2022 年), 年均发文量为 810 篇。中国在 WOS 上发表的成果为 5239 篇, 占文献检索总量的 90%, 其中, 中国科学院发表文章数量最多, 占 36.1%, 其次为西北农林科技大学水土保持研究所(23.2%)、西北大学(11.4%)、北京师范大学(6.9%)和兰州大学(5.8%)。这表明, 黄土高原关键带土壤水文过程的研究未来仍将保持较大发展趋势, 中国在该领域的研究仍保持领先地位。

1.3 文献计量分析

文献计量分析能够高效掌握学术界的 research 现状, 通过文献计量工具提供的文献计量指标的分析(如聚类、共现等), 可以对某个研究领域有一个基本的分类, 有助于该领域研究热点的识别(孙雨生等, 2014; 王涵等, 2021)。本文选用 VOSviewer 软件, 将 WOS 筛选出的文献进行聚类可视化展示, 分析黄土高原关键带土壤水文过程的研究热点。以摘要中词频最少出现 15 次进行聚类, 共筛选出相关字段 352 个, 形成聚类区块 5 个, 连接线 3183 条(图 3-a)。聚类分析表明, 黄土高原关键带土壤水文过程的研究主要表现在 5 个方面, 分别是土壤特性及土壤结构(Cluster #1, 102 个字段, 包括土壤含水量、水分监测、土壤稳定性、凝聚性、土壤压实、冻融循环、多孔介质、孔隙水压力等)、环境因素及土地管理方式(Cluster #2, 99 个字段, 包括气候变化、通量、表面温度、灌溉系统、蒸散发、土地利用、土壤-大气界面等)、水分运移规律(Cluster #3, 75 个字段, 包括含水层、降水事件、流动、地表径流、渗滤、基岩、地形等)、生态系统(Cluster #4, 44 个字段, 包括浓度、碳排放、 N_2O 、森林、有机质、生产力、湿地等)及植被耗水特征(Cluster #5, 32 个字段, 包括植被根系、干燥化、吸水率、水资源利用率等)。研究领域在地质

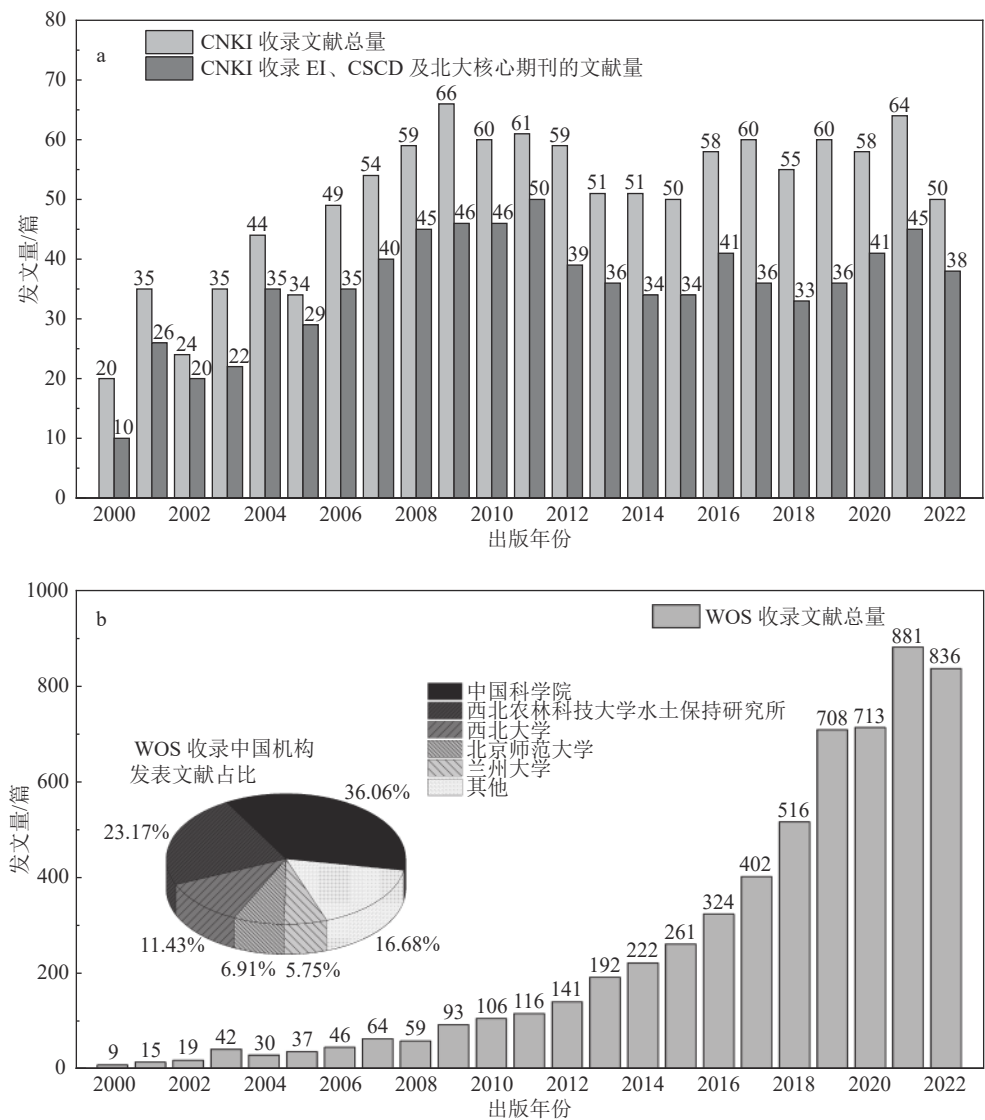


图 2 黄土高原关键带土壤水文过程年发文趋势

Fig. 2 Annual published literature trend chart of soil hydrological process in the CLP-CZ

a—CNKI 收录黄土高原关键带土壤水文过程文献情况; b—WOS 收录黄土高原关键带土壤水文过程文献情况

学、地球物理学、土壤学、生态学等的基础上,呈现出多学科交叉融合的特征。

黄土高原关键带土壤水文过程当前的研究热点如图 3-b 所示。传统的研究主要聚焦于 Cluster #2 和 Cluster #3 中的地表径流、蒸散发、浓度、入渗、生态系统等方面。近些年的研究主要集中在 Cluster #1 中的测试方法、凝聚性、抗剪强度、冻融循环、土壤水分特征曲线、多孔性质、粒径等方面,土壤孔径尺度的研究逐渐受到重视 (Dexter, 1988; Dexter et al., 1992)。通过各类表征手段对土壤微观结构进行解析,是明确土壤孔性及其与水分和溶质运移关系、揭示土壤水文过程时空异质性的前沿性探索。因此,

有必要厘清土壤水文观测手段与水分运移模型,明确黄土高原土壤水文过程在生态建设中的科学内涵。

2 黄土高原关键带土壤水文过程研究进展

2.1 土壤水文过程观测方法

受温带大陆性季风气候影响,黄土高原关键带大部分区域处于暖温带和中温带半干旱区,土壤含水量受降水影响最显著。自然降水通常需转化为土壤水才能被地表植被及农作物利用 (邵晓梅等, 2004)。因此,土壤水分的监测方法与技术一直是学界重点研究的领域。土壤水分监测方法有多种 (表 1),根据研究手段和应用范围可分为 3 类: 取样-定位测

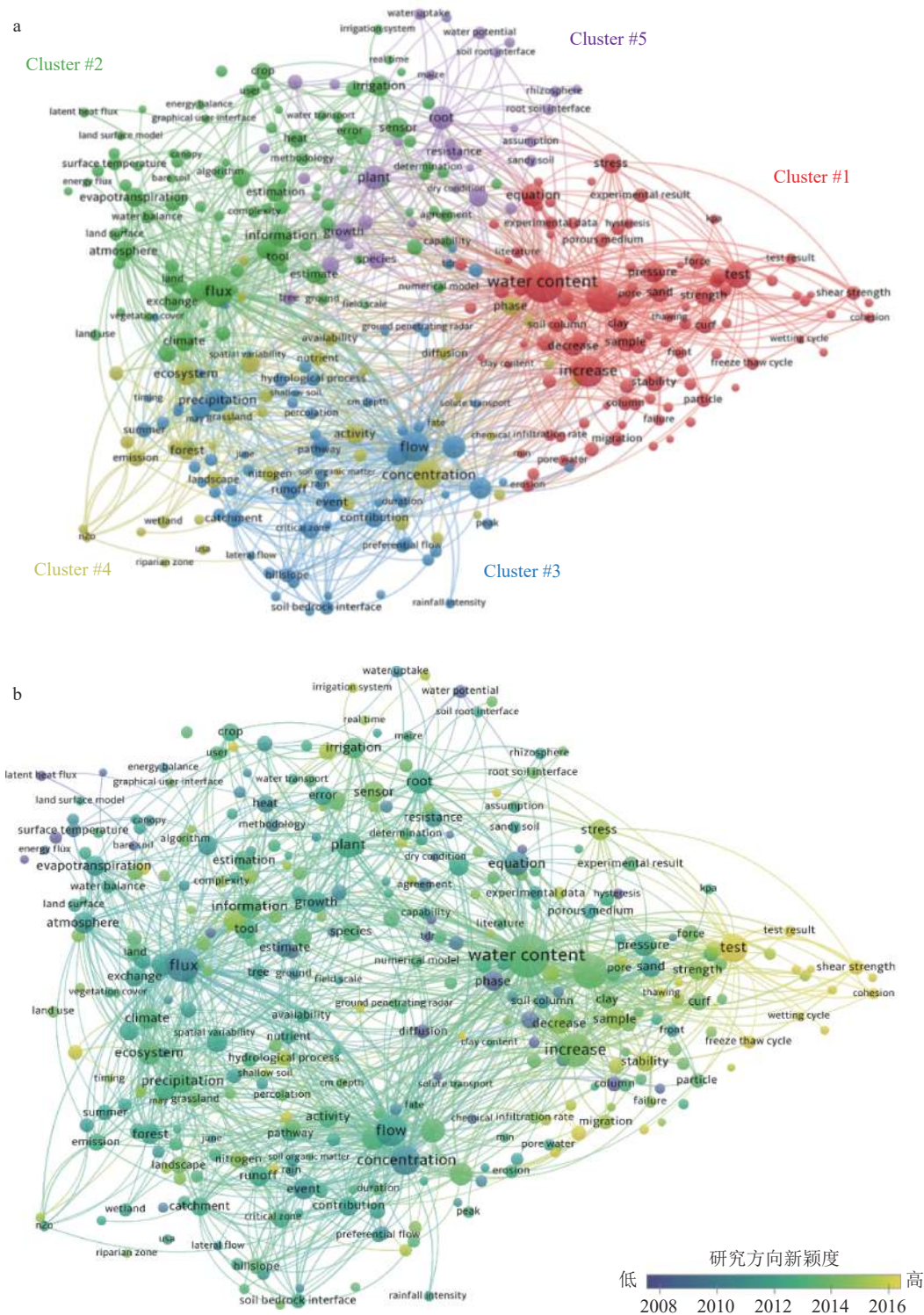


图3 黄土高原关键带土壤水文过程文献聚类可视化分析 (a) 及研究热点图 (b)

Fig. 3 Literature on soil hydrological process (a) clustering visualization analysis and research hotspots (b) in the CLP-CZ

量法、遥感反演法和模型模拟法。对于取样-定位测量法,传统的称重烘干法、中子法、水势法、示踪剂法和介电常数法测量土壤含水量精度高、操作方便,

但测量信息常以点位计算、区域代表性较差。提高测量密度和频率可以有限地消除这一影响,但投入的人力成本较高 (朱安宁等,2009);地球物探技术反

表 1 土壤水分监测方法及特点

Table 1 Typical methods and characteristics of soil moisture monitoring

监测方法	应用尺度	探测方式	相关设备及技术	适用性	局限性
取样称重烘干法	田间、场地尺度	直接	烘箱、烘干法水分测定仪等	操作方便, 设备简单, 精度高	连续取样工作量大, 费时费力
中子散射法(Fan et al., 2010; 魏玉涛等, 2021)	田间、场地尺度	直接	中子水分测定仪	可周期性测定土壤水分, 获取实时数据, 精度高	垂直分辨率较差, 因存在放射源导致安全性较差
土壤水势法(常学尚等, 2021; Li et al., 2022)	田间、场地尺度	间接	张力计、露点水势仪等	操作方便, 仪器设备简单	易受环境影响, 测量精度低
介电常数法(Noborio, 2001)	坡面、田间、场地尺度	间接	时域反射仪(TDR)、频域反射仪(FDR)	布设及操作方便, 对土体扰动小, 响应快, 精度高	易受到土壤孔隙、温度及容重影响
示踪剂法(Ren et al., 2018)	流域、坡面、田间尺度	间接	同位素示踪剂、温度示踪剂等	投放简单, 不存在放射性危害	某些示踪剂需要排除降水对实验的影响
地球物探技术反演法(朱青等, 2019)	流域、坡面、田间尺度	间接	电阻率层析成像仪(ERT)、探地雷达(GPR)、大地电导率仪(EMI)、宇宙射线中子流(CRNP)等	探测灵敏度高, 可实现高密度数据采集, 并快速反演空间分辨率的土壤水分	仪器成本高, 图像解译难度较大, 数据反演依赖于经验关系和物理模型
遥感法(胡猛等, 2013; 贺缠生等, 2021)	区域、流域尺度	间接	植被指数法、微波技术遥感法、高光谱遥感法	成本低, 动态对比性强, 适用于大尺度监测	作物生长和植被覆盖通常会对土壤水反演精度造成影响
模型模拟法(Narayanan et al., 2001; 申慧娟等, 2003)	不限	间接	神经网络模型、陆面数据同化模型、土壤水动力学模型等	时间及人力成本投入低, 数据获取量高	侧重于数学建模, 强调理论探索, 相关研究尚需深入

演法可以在断面及空间尺度上完整地反映土壤水分的时空分布规律, 但仪器成本高、反演解译难度大。20 世纪末, 遥感技术被应用于区域尺度土壤水分的反演, 随着空间分辨率的不断提高, 遥感技术可在不同尺度反演土壤含水量, 然而这种方法受植被指数、大气层水汽含量、后向散射系数及地表状况复杂程度的影响较大, 通过建立回归模型间接估算土壤水分仍然具有局限性(胡猛等, 2013)。模型模拟是根据土壤水分参数在模型工具的运算下对土壤水文信息进行推测和估算(Narayanan et al., 2001), 该方法更多侧重于建模与验证关系, 对于土壤水文这一复杂的动态过程往往刻画地并不深入, 但在数据的时空连续性、情景判别等方面具有独特优势和科学价值。

目前, 黄土高原土壤水分多采用烘干法、中子法或介电常数法进行长期监测(Wang et al., 2020; 魏玉涛等, 2021)。此外, 乔新涛等(2019)证实探地雷达(GPR)信号属性能够用来反演黄土高原矿区复垦农田土壤含水量, 并建立了二者之间的数学模型。

Sun et al. (2020) 引入电阻率层析成像(ERT)技术, 建立了不同场地土壤电阻率与土壤含水量的线性和非线性模型, 获得了可信的土壤水分数据。Wang et al. (2019) 利用宇宙射线中子探针(CRNP)对黄土高原小流域 3 种质地的土壤水分进行连续监测, 结果证明 CRNP 可以准确测定黄土复杂下垫面的土壤含水量, 测定土壤水分的足迹半径最高可达 174 m, 进而较可靠地评估了黄土高原退耕还林还草等土地利用变化对水资源的影响。这些地球物探反演新技术能够有效描述黄土高原土壤水分含量及其动态变化特征, 并能对土壤水文过程进行有效的尺度转换。因此, 发展成本更低、测量精度更高、研究尺度更大的地球物探反演技术, 并与土壤水文模型高效结合将是探索黄土高原关键带土壤水文过程时空分异特征的新热点。

2.2 土壤水文模型

开发土壤水文模型是解析环境因素对土壤水文过程影响机制的重要手段(Blöschl et al., 2019; 贺缠生等, 2021)。表 2 列出了目前地球关键带土壤水文

表 2 地球关键带土壤水文模型及应用特征

Table 2 Soil moisture models and their application characteristics in Earth's Critical Zone

模型名称	开发年份	开发国家	应用尺度	应用范围	模型功能
EPIC 模型(Williams et al., 1984)	1984	美国	田间尺度	土壤侵蚀连续模拟	综合评估土壤侵蚀对生产力的影响,并预测管理模式对土壤、水分、养分、农药运动及作物产量的影响
SPAW 模型(Arora et al., 1996)	1989	美国	流域、田间尺度	径流、渗透、蒸发蒸腾和土壤水渗流模拟	预测农业水文学及其与土壤和作物生产的相互作用
VIC模型(Liang et al., 1994)	1992	美国	区域、流域尺度	陆面过程、汇流模拟	基于空间分布网格化的分布式水文模型,可同时进行陆-气间能量平衡和水量平衡的模拟
WAVES 模型(Zhang et al., 1996; 叶林媛等, 2020)	1993	澳大利亚	田间尺度	生态系统蒸渗及水盐平衡模拟	在日时间步长上模拟土壤-植物-大气连续体中水、能量、溶质的动态输移过程
SWAT模型(Arnold et al., 1993)	1994	美国	流域尺度	水土流失、非点源污染、农业管理及径流模拟	预测在大流域复杂土壤类型、土地利用方式下,土地管理对水分、泥沙和化学物质的长期影响
HYDRUS 模型(廖凯华等, 2018)	1998	美国	坡面、田间尺度	土壤水分和溶质运移模拟	采用Richards方程(Celia et al., 1990)描述土壤水分运动过程,模拟饱和和多孔介质的水流、溶质运移、根系吸水 and 溶质吸收、热量传输模拟

过程研究领域的经典模型,这些模型的开发大多集中在 20 世纪 80—90 年代。美国因 20 世纪中期面临严重的土壤侵蚀、水土流失、土地污染等问题,是研究水土模型最早和最多的国家 (Vose et al., 2011)。通过立法(20 世纪 60 年代末颁布《自然资源保护法》),联邦政府联合美国农业部开展全国自然资源普查及治理工作,拓展了水土保持及防止土壤侵蚀的工作内容 (冯慧敏等, 2009)。在调查方面对土地单元、降水过程、农作物利用、蒸发蒸腾、溶质运移、能量传输等环节做了系统性研究,在治理方面对原有梯田、地埂等土地设施进行改造,从流失地块治理转向以田间、小流域尺度治理为中心,因此催生了适用于这类尺度水文模型的发展 (Gutiérrez et al., 2006; 冯慧敏等, 2009; Vose et al., 2011; Mello et al., 2016)。

土壤水文模型已经成功运用到了中国黄土高原关键带土壤水文过程研究中。卢爱刚等 (2011) 通过 SWAT 模型发现暴雨事件是导致汭河流域土壤侵蚀的主要因素。吴普特等 (2017) 利用 VIC 模型对黄土高原雨水资源化潜力进行定量分析,发现黄土高原雨水资源化潜力多年平均值为 $1807 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占区域蒸散发耗水总量的 80%。Li et al.(2019) 利用 HYDRUS-1D 模型模拟了不同年限农田和苹果园的土壤水分状况,发现果园改作耕地显著降低了土壤剖面深度 10 m 以上的土壤水分储量,减少了地下水回灌量,增加了果树蒸腾量。Wang et al. (2011) 以黄

土高原的一组长期试验数据为基础,证实 EPIC 模型可作为半干旱区土壤水分估算的有效工具,评估了降雨年、种植制度对不同土层土壤水分动态变化的影响。可见,模型模拟有助于揭示地球关键带不同尺度土壤-植物-大气-地下水连续体间的水分迁移和转化特征。随着新时期黄土高原关键带土壤水文过程在不同尺度和不同界面的生物调控机制、水碳循环耦合过程及评估人类活动对脆弱生态系统稳定性等前沿问题的深入,开发和运用多参数耦合、多过程互馈、多功能预测、多尺度应用的水文模型是未来关注的热点。

2.3 土壤水文过程调查与填图

土壤调查与填图的目的是获取土壤属性的时空演变信息,并以地图形式进行表达,为国土资源的利用提供空间数据支持 (张甘霖等, 2020)。土壤填图大致经历了 2 个发展阶段:传统填图和数字化填图。传统填图通过资料获取—现场调查—室内分析—校核成图的步骤进行,受限于野外调查成本、样本数量等条件,填图范围往往局限于剖面、样方和坡面尺度,且填图分辨率较低 (Grunwald, 2009; Grunwald et al., 2011; Hartemink et al., 2016)。数字化土壤填图有别于传统填图模式,是一种基于遥感、地理信息系统 (GIS)、地学模型等技术将与土壤相关的地理环境信息进行识别,并将其作为协变量,通过统计或预测方法对土壤属性进行精准刻画 (Hengl et al., 2017),从而优化土地利用方式和管理模式 (图 4)。进行数字

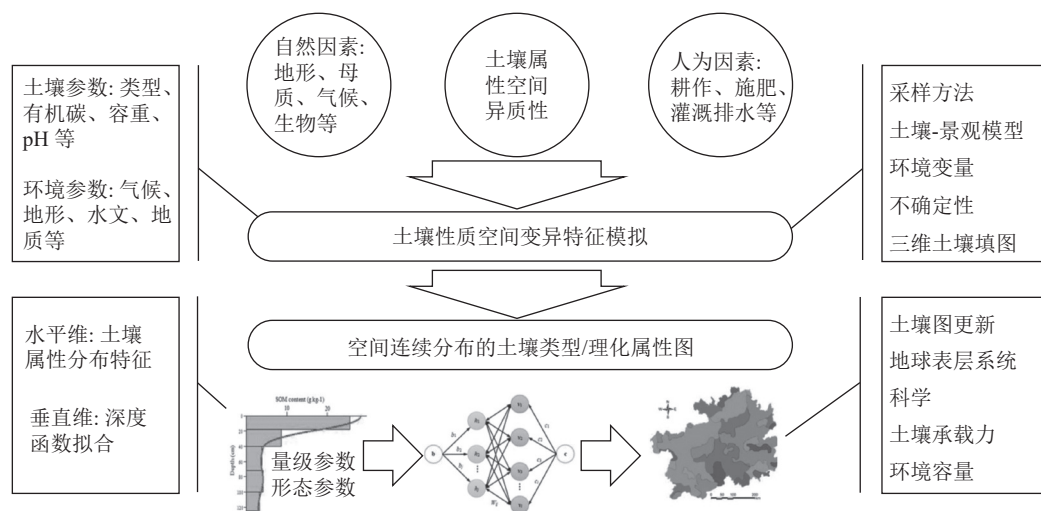


图 4 数字土壤填图基本范式(据张甘霖等, 2020)

Fig. 4 Paradigm of digital soil mapping

土壤填图的统计或预测方法主要包括经典统计法、克里金插值法 (Zhang et al., 2011; Yang et al., 2016)、模糊逻辑 (Zhu et al., 1997)、决策树法 (Quinlan, 1996)、模糊森林法 (王奕森等, 2018) 等, 这些方法使数字化填图在应用范围、信息整合、测算精度、图像降噪等方面均获得了显著提升。

数字化填图技术在研究黄土高原关键带土壤水文过程方面也较普遍。例如, 焦峰等 (2005, 2006) 建立了陕北安塞县野外观测数据与图形数据库间的对应关系, 明确了 0~5 m 平均土壤含水量小于 6.4% 的土地面积占总土地面积的 9.23%, 而平均土壤含水量大于 10.8% 的土地面积仅占总土地面积的 5.31%。Jin et al. (2016) 利用黄土高原 435 个气象站 1980—2010 年的降水资料, 采用多元线性回归克里金法和地理加权回归克里金法, 建立了黄土高原不同尺度年平均降水的 500 m 分辨率高精度分布图。Tang et al. (2015) 利用 Landsat 专题地图、数字高程模型、土地利用图和降水数据, 将修订的通用水土流失方程 (RUSLE) 与 GIS 技术相结合, 估算黄土高原燕沟流域水土流失及其空间分布。结果表明, 集成的 RUSLE-GIS 模型可以精确地评价黄土高原流域尺度的土壤侵蚀, 研究区 50% 以上面积的土壤模拟流失量小于 40 t/(ha·a), 且 52.2% 的土壤流失发生在林地, 淤泥覆盖地和梯田的土壤流失量仅占总土壤流失量的 7.6%。Rao et al. (2022) 提出了一种基于极限梯度增强的机器学习方法, 绘制了毛乌素沙地地下水水位图动态特征, 结果表明, 该方法可建立空间分

辨率为 250 m 的地下水地理空间图谱, 相对于普通空间插值法, 该方法的评价精度更高。上述研究大多对黄土高原地区浅层含水层特征、降水分布格局、水土流失空间格局、地下水存储格局等进行了测算, 而对黄土高原深层土壤剖面水分时空分布特征仍难以精准测算, 相关技术手段与统计方法也鲜有报道, 这仍将是未来需进一步深入探索的方向。

2.4 土壤水文过程管理及土壤干燥化认知

地球关键带土壤水文过程研究以“4M”研究体系为依托, 对监测、模型预测和填图提供的基本要素进行整合, 发展水土过程系统性、预测性及精细化的管理模式 (图 5)。从农耕时期到城市化建设时期, 人类有意识地改变地球关键带的供应、支持和调节功能, 以获取更高的土地利用效益 (Richardson et al., 2017)。在黄土高原关键带土壤水文条件日益复杂的情况下, 提升和完善土壤水文过程管理是黄土高原农业生产、生态恢复和城市发展的关键 (Lin, 2010; Bouma, 2012)。因此, 在长期的认知与实践过程中, 中国发展出以可持续农业为目的的施肥管理、灌排管理、水盐迁移管理、土地利用管理等模式 (彭新华等, 2020), 以生态治理与恢复为目的的三北防护林工程、山水林田湖草系统等管理模式, 以促进植被生长为目的的疏伐、间作、林下覆盖处理等管理模式, 以及以提升土地利用效率、城市污水处理为目的的土地处理系统、尾水湿地工程等管理模式。

在黄土高原土壤水文效应的研究中发现, 植被建设对土壤水分有明显的降低作用, 且人工林与土

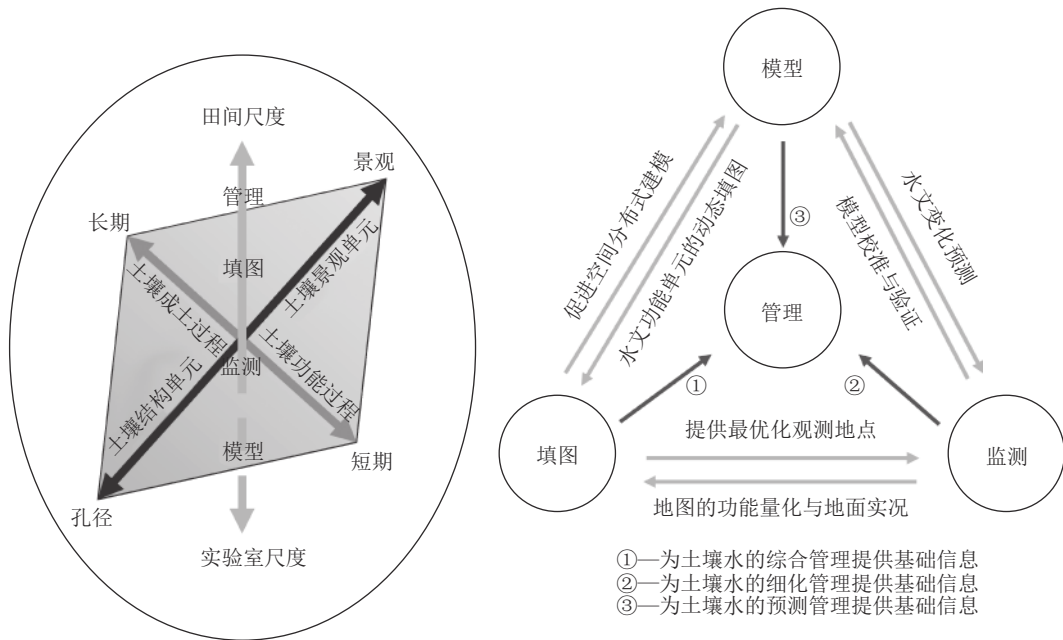


图5 地球关键带土壤水文过程研究的时间、空间、方法三维框架和系统关系示意图(底图据 Ma et al., 2017)

Fig. 5 Three dimensional framework and system relationship diagram of time, space and method of soil hydrological process in the earth critical zone

壤水分存在更为强烈的互馈效应 (Shao et al., 2018)。丁文斌等 (2022) 研究认为, 植被建设导致黄土高原土壤水分含量显著降低, 且不同植被类型对土壤水分的消耗由大到小为乔木、灌木、草本。植被建设对土壤水分的消耗随着生长年限的增长而加剧, 对土壤水分的影响程度随着年均降雨量的增大而减小。邹俊亮等 (2011) 发现, 黄土高原植被覆盖为柠条或小叶杨时, 不同土壤类型由于质地的差异对土壤水分剖面的垂直分布会造成较大影响, 具体表现为: 土壤类型在 0~100 cm 之间对土壤水分影响微弱, 但在 100~600 cm 之间对土壤水分影响极明显; 此外, 不同植被对表层(0~20 cm)土壤水分影响较小, 对深层(20~600 cm)土壤水分影响显著。Li et al. (2008) 研究发现, 黄土高原中部地区植物种类、坡向和坡度可能是土壤干层形成的主要因素, 且这些因素对 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤容重、孔隙度、植物有效容量和导水性也有显著影响, 刺槐人工林比辽东栎天然林土壤水分更亏缺。另外, 相关报道指出黄土高原人工林根系生长可至 20 m 以下的土壤层, 耗水深度超过 20 m (Li et al., 2018)。这表明, 当前的关键带深层土壤水文过程管理已难以满足黄土高原植被建设的现实需求, 运用系统的监测方法和耦合模型, 如光纤监测 (Sayde et al., 2014)、植被动态

耦合模型 (He et al., 1999) 等, 在深剖面开展多要素的土壤-植被-水文过程互馈与土壤干燥化演化机制研究, 有助于深化黄土高原关键带深层土壤水文过程与生物地球化学过程耦合演化机制的认知。

3 黄土高原关键带土壤水资源优化管理的对策建议

3.1 黄土高原关键带土壤水资源现实问题

土壤水是陆地水循环的重要组成, 在促进物质能量循环和支撑生命活动过程中扮演着重要角色。土壤水资源具备自然资源特性, 容易受到人类活动的影响, 是地球关键带生态可持续性研究中重点关注的环节 (Bai et al., 2021; Castellini et al., 2022)。由于土层深厚, 黄土高原关键带土壤水资源储量较丰富, Zhang et al. (2020) 分析了黄土高原植被恢复和降水梯度下, 0~5 m 深度土壤有效水容量为 762.9 mm, 植物有效水储量为 257.3 mm。然而据文献记载, 剧烈的气候变化及不合理的人类活动导致黄土高原土壤水资源与水土环境面临长期生态风险 (Jia et al., 2020; Li et al., 2021; 孙萍萍等, 2021; Wang et al., 2024)。根据在黄土高原关键带产生位置的不同, 这些生态风险可大致划分为 4 类: ①在土壤-大气界面, 产生土壤侵蚀、水土流失等现象; ②在土壤-植被

界面,产生土壤干燥化、“小老树”等现象;③在包气带含水层,产生黄土湿陷、养分流失、污染物迁移等现象;④在土壤-基岩界面,产生漏失潜蚀、地下含水层下降等现象。可见,土壤水几乎参与了上述各个界面的水文过程并导致一系列生态问题。

3.2 黄土高原关键带土壤水资源提升的对策与建议

黄土高原生态问题由来已久,地理环境与人为扰动因素严重制约了季风前缘与生态脆弱地区的自然生态修复进程。20 世纪 50 年代起,围绕黄土高原开展的生态治理工程成为中国大力推进的重点工程(图 6),总体看,黄土高原人地关系发生了改变,目前实施的水土流失治理措施和工程均取得了显著生态效益;然而,黄土高原整体生态环境脆弱的特点仍然没有改变,黄土高原水土流失严重等老问题尚未完全解决,并且在关键带生态服务功能的认识、研究、评估的过程中发现,黄土高原土壤水文过程又面临新的问题,如:黄土区域第一产业增长乏力、水土流失治理模式的经营维护较落后、大规模退耕引发局部水资源亏缺、生态治理工程目标缺乏系统性、变绿与变富矛盾依然存在等(刘国彬等,2017;李宗善等,2019)。

未来提升黄土高原关键带服务功能需要从探究

气候变化规律、深化关键带水文过程认知、集成关键带“4M”研究体系、明确生态治理方向 4 个方面入手。①探究气候变化规律方面,需统筹地球化学、水文学、气象学与相邻学科的交叉,未来气候变得更加干旱或湿润,直接影响着黄土高原土壤水的输入和输出,同时也决定着黄土高原土壤水的生态效应和调控策略;②关键带水文过程研究方面,要深入研究关键带结构、过程、功能与土壤水文过程之间的相互关系,全面认识土壤水文过程与生物地球化学循环和生态过程存在的相互作用与影响;③“4M”体系方面,发展高原土壤水文科学观测技术和综合模型,预测黄土高原关键带土壤水分演变趋势,遵循高阶的数字化填图范式,评估黄土高原关键带服务功能的可持续性,提高对水、土资源的管理水平;④生态治理方面,需统筹山水林田湖草沙多种环境要素,因地制宜,精准识别黄土高原关键带土壤、气候、水文特征,从土壤健康角度出发(图 6),协调土地管理模式与水文功能关系,使区域生态系统服务整体向健康方向发展。

4 总结与展望

2000 年以来,有关黄土高原关键带土壤水文过程的研究成果显著增加,中国在该领域发表研究成

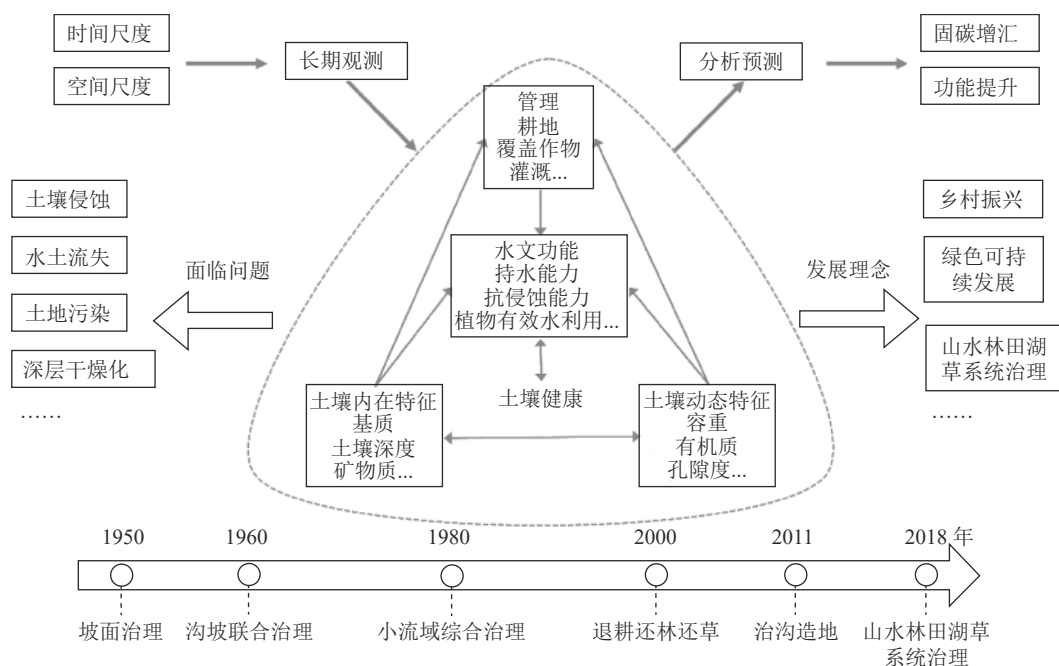


图 6 土壤水文过程管理与功能提升

Fig. 6 Soil hydrological process management and function improvement

果占 WOS 总发文量的 90%, 未来仍将保持领先地位。国内外的研究呈现出多领域、多手段、多尺度的特点: 在研究领域上, 呈现出地质学、地球物理学、土壤学、生态学等多学科交叉融合的特点; 在研究手段上, 完善了地球物探技术反演法、遥感反演法、模型模拟法等新技术; 在研究对象上, 由传统的土壤水含量、地表径流等景观尺度深入到土壤粒径、多孔介质等土壤孔径尺度。本文回顾了黄土高原关键带土壤水文过程在监测、模型、填图及管理(“4M”框架)等方面的研究进展, 提出了黄土高原关键带土壤水文过程管理对策与建议。从提升土壤水文生态功能、保护自然资源、解决关键带科学问题的角度出发, 黄土高原关键带土壤水文过程的研究未来需关注以下科学问题。

(1) 随着新时期黄土高原关键带水文过程研究的深入和细化, 极端环境条件, 尤其是气候变化(极端降水或温度)和人类活动(重大生态工程), 能否对黄土高原关键带多尺度土壤水文过程(降水入渗、蒸散发、土壤水分运动)产生不可逆转的影响? 阈值是多少? 解决该问题需健全“4M”方法体系——创新土壤水文过程的观测手段、提高模型预测和反演精度、遵循高阶的数字化填图范式、提出地球关键带土壤水文过程的最优管理模式。

(2) 变化条件下土壤水文过程会产生怎样的环境效应(如土壤干层形成、土壤酸化等)? 这需要依托野外科学观测研究站, 获得长时间序列的连续原位观测数据来解析多尺度土壤水文过程的级联效应与机制、水碳耦合循环、水文过程主导的生态系统稳定性等系统性问题, 同时加强土壤微观结构与过程的观测与模拟, 揭示土壤水文过程驱动的生物地球化学转化过程与微观机制, 进而阐明不同条件下土壤水文过程在不同尺度上的生态与环境效应。原位观测研究既能回答具体的区域性问题的, 又可以联合形成全球关键带网络, 最终形成普适性的观测和研究成果, 服务人类福祉。

(3) 黄土高原土壤水文过程在地球关键带科学与重大生态建设中发挥着什么样的功能与作用? 未来需要发展并完善黄土高原关键带中与水文过程关联的植被生长、水土保持、固碳增汇等过程的系统性研究, 并强化物质与能量在水-土、土-气、水-植、土-岩等界面的迁移转化机理研究, 凸显土壤水文过程在地球关键带多尺度多过程整体性研究中的重要角

色与功能。同时, 随着人类世的到来, 土壤水文过程对重大人为活动的响应与适应地球关键带服务功能持续发挥的前沿科学问题, 也是实现变化环境下土壤水资源可持续利用的关键, 相关问题的系统性解答是巩固生态环境建设成果的必然需求。

References

- Amundson R, Richter D D, Humphreys G S, et al. 2007. Coupling between biota and earth materials in the critical zone[J]. *Elements (Quebec)*, 3(5): 327–332.
- Arnold J G, Allen P M, Bernhardt G. 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model[J]. *Journal of Hydrology*, 142(1): 47–69.
- Arora V K, Gajri P R. 1996. Performance of simplified water balance models under maize in a semiarid subtropical environment[J]. *Agricultural Water Management*, 31(1): 51–64.
- Bai X, Jia X X, Zhao C L, et al. 2021. Artificial forest conversion into grassland alleviates deep-soil desiccation in typical grass zone on China's loess plateau: Regional modeling[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 320: 107608.
- Blöschl G, Cudennec C, Fiori A, et al. 2019. Twenty-three unsolved problems in hydrology (uph)—A community perspective[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 64(10): 1141–1158.
- Bouma J. 2012. Chapter 15—hydropedology as a powerful tool for environmental policy and regulations: Toward sustainable land use, management and planning[C]//Lin H. *Hydropedology*. Boston: Academic Press: 483–512.
- Castellini M, Di Prima S, Stewart R, et al. 2022. Advances in ecohydrology for water resources optimization in arid and semi-arid areas[J]. *Water*, 14(12): 1830.
- Celia M A, Bouloutas E T, Zarba R L. 1990. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation[J]. *Water Resources Research*, 26(7): 1483–1496.
- Chang X S, Chang G Q. 2021. Advances in research and prospect on soil moisture in arid and semi-arid areas[J]. *Journal of Desert Research*, 41(1): 156–163(in Chinese with English abstract).
- Chen H, Shao M, Li Y. 2008. Soil desiccation in the loess plateau of China[J]. *Geoderma*, 143(1/2): 91–100.
- Chorover J, Kretzschmar R, Garcia-Pichel F, et al. 2007. Soil biogeochemical processes within the critical zone[J]. *Elements*, 3(5): 321–326.
- Cleverly J, Eamus D, Restrepo Coupe N, et al. 2016. Soil moisture controls on phenology and productivity in a semi-arid critical zone[J]. *Science of the Total Environment*, 568: 1227–1237.
- Dexter A R. 1988. Advances in characterization of soil structure[J]. *Soil & Tillage Research*, 11(3/4): 199–238.
- Dexter A R, Young I M. 1992. Soil physics towards 2000[J]. *Soil & Tillage Research*, 24(2): 101–106.
- Ding W B, Wang F. 2022. The effects of vegetation construction on soil

- moisture in the loess plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 42(13): 5531–5542(in Chinese with English abstract).
- Fan J, Shao M A, Wang Q J, et al. 2010. Toward sustainable soil and water resources use in China's highly erodible semi-arid loess plateau[J]. *Geoderma*, 155(1/2): 93–100.
- Feng H M, Lei T W, Zhang J W, et al. 2009. An introduction of soil and water conservation legal system in USA[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 16(3): 276–280(in Chinese with English abstract).
- Feng X, Fu B, Piao S, et al. 2016. Revegetation in China's loess plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 6(11): 1019.
- Georgiou K, Jackson R B, Vinduskova O, et al. 2022. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon[J]. *Nature Communications*, 13(1): 1–12.
- Grunwald S. 2009. Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches[J]. *Geoderma*, 152(3): 195–207.
- Grunwald S, Thompson J A, Boettinger J L. 2011. Digital soil mapping and modeling at continental scales: Finding solutions for global issues[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 75(4): 1201–1213.
- Guan Y, Zhou W, Bai Z, et al. 2020. Soil nutrient variations among different land use types after reclamation in the Pingshuo opencast coal mine on the loess plateau, China[J]. *Catena*, 188: 104427.
- Gutiérrez Jurado H A, Vivoni E R, Harrison J B J, et al. 2006. Ecohydrology of root zone water fluxes and soil development in complex semiarid rangelands[J]. *Hydrological Processes*, 20(15): 3289–3316.
- Hartemink A E, Minasny B. 2016. Digital soil morphometrics[M]. Springer International Publishing.
- He C S, Tian J, Zhang B Q, et al. 2021. A review of advances in impacts of soil hydraulic properties on hydrological processes, challenges and opportunities[J]. *Advances in Earth Science*, 36(2): 113–124(in Chinese with English abstract).
- He H S, Mladenoff D J, Crow T R. 1999. Linking an ecosystem model and a landscape model to study forest species response to climate warming[J]. *Ecological Modelling*, 114(2/3): 213–233.
- Hengl T, de Jesus J M, Heuvelink G B M, et al. 2017. Soilgrids250m: global gridded soil information based on machine learning[J]. *Plos One*, 12(2): 1–40.
- Huang L M, Shao M A. 2019. Advances and perspectives on soil water research in China's loess plateau[J]. *Earth-Science Reviews*, 199: 102962.
- Huang M, Gallichand J. 2006. Use of the shaw model to assess soil water recovery after apple trees in the gully region of the loess plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 85(1/2): 67–76.
- Huang T M, Pang Z H. 2011. Estimating groundwater recharge following land-use change using chloride mass balance of soil profiles: A case study at Guyuan and Xifeng in the loess plateau of China[J]. *Hydrogeology Journal*, 19(1): 177–186.
- Huang T, Pang Z, Edmunds W M. 2013. Soil profile evolution following land-use change: implications for groundwater quantity and quality[J]. *Hydrological Processes*, 27(8): 1238–1252.
- Hu M, Feng Q, Xi H Y. 2013. Progress of monitoring soil moisture by remote sensing in arid areas[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 44(5): 1270–1275(in Chinese with English abstract).
- Jiao F, Wen Z M, Chen Y M. 2005. Mapping and quantitative analysis of soil moisture using GIS techniques[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 12(3): 129–131,177(in Chinese with English abstract).
- Jiao F, Wen Z M, Chen Y M, et al. 2006. Mapping and quantitative analysis of soil moisture of Ansai county based on GIS techniques[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 4(1): 75–80(in Chinese with English abstract).
- Jia X, Shao M A, Wei X, et al. 2020. Policy development for sustainable soil water use on China's loess plateau[J]. *Science Bulletin*, 65(24): 2053–2056.
- Jin Q, Zhang J, Shi M, et al. 2016. Estimating loess plateau average annual precipitation with multiple linear regression kriging and geographically weighted regression kriging[J]. *Water*, 8(6): 266.
- Li B, Wang Y, Hill R L, et al. 2019. Effects of apple orchards converted from farmlands on soil water balance in the deep loess deposits based on HYDRUS-1D model[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 285: 106645.
- Li H, Han S, Wu X, et al. 2021. Distribution, characteristics and influencing factors of fresh groundwater resources in the loess plateau, China[J]. *China Geology*, 4(3): 509–526.
- Li H, Liu W, Zhan H, et al. 2022. Effect of barometric pumping on relative humidity in the loessal soil of the loess plateau[J]. *Geoderma*, 424: 116008.
- Li H, Si B, Li M. 2018. Rooting depth controls potential groundwater recharge on hillslopes[J]. *Journal of Hydrology*, 564: 164–174.
- Li W, Wang Q J, Wei S P, et al. 2008. Soil desiccation for loess soils on natural and regrown areas[J]. *Forest Ecology and Management*, 255(7): 2467–2477.
- Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 99(D7): 14415.
- Liao K H, Lu L G. 2018. Advances in research of hillslope soil hydrological processes in the humid region of Southeast China[J]. *Progress in Geography*, 37(4): 476–484(in Chinese with English abstract).
- Lin H. 2010. Earth's critical zone and hydrogeology, concepts, characteristics, and advances[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(1): 25–45.
- Lin H, Drohan P, Green T R. 2015. Hydrogeology: the last decade and the next decade[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 79(2): 357–361.
- Liu G B, Shang G Z P, Yao W Y, et al. 2017. Ecological effects of soil conservation in loess plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, (1): 11–19(in Chinese with English abstract).
- Liu J, Rühland K M, Chen J, et al. 2017. Aerosol-weakened summer monsoons decrease lake fertilization on the Chinese loess plateau[J]. *Nature Climate Change*, 7(3): 190–194.

- Li Z S, Yang L, Wang G L, et al. 2019. The management of soil and water conservation in the loess plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(20): 7398–7409(in Chinese with English abstract).
- Lu A G, Suo A N, Zhang L. 2011. Simulation of spatial pattern of soil water loss in a watershed of the loess plateau based SWAT model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 18(2): 57–61(in Chinese with English abstract).
- Luo Z B, Fan J, Shao M A. 2022. Progresses of weathered bedrock ecohydrology in the Earth's critical zone[J]. *Chinese Science Bulletin*, 67(27): 3311–3323(in Chinese with English abstract).
- Lü Y, Hu J, Fu B, et al. 2019. A framework for the regional critical zone classification: the case of the chinese loess plateau[J]. *National Science Review*, 6(1): 14–18.
- Ma Y, Li X, Guo L, et al. 2017. Hydopedology: interactions between pedologic and hydrologic processes across spatiotemporal scales[J]. *Earth-Science Reviews*, 171: 181–195.
- Mccoll K A, Alemohammad S H, Akbar R, et al. 2017. The global distribution and dynamics of surface soil moisture[J]. *Nature Geoscience*, 10(2): 100.
- Memillan H, Gueguen M, Grimon E, et al. 2014. Spatial variability of hydrological processes and model structure diagnostics in a 50 km² catchment[J]. *Hydrological Processes*, 28(18): 4896–4913.
- Mello C R D, Norton L D, Pinto L C, et al. 2016. Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes[J]. *Ciência E Agrotecnologia*, 40(1): 7–25.
- Narayanan R M, Hirsave P P. 2001. Soil moisture estimation models using sir-c sar data: a case study in new hampshire, USA[J]. *Remote Sensing of Environment*, 75(3): 385–396.
- Noborio K. 2001. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: A review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31(3): 213–237.
- Peng X H, Wang Y Q, Jia X X, et al. 2020. Some key research fields of Chinese soil physics in the new era: Progresses and perspectives[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 57(5): 1071–1087(in Chinese with English abstract).
- Qiao X T, Cao Y, Bi R T. 2019. Characteristics of soil water content of reclamation farmland in mining area of the loess plateau based on AEA method[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 50(1): 63–69(in Chinese with English abstract).
- Quinlan J R. 1996. Improved use of continuous attributes in C4.5[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 4: 77–90.
- Rao P, Wang Y, Liu Y, et al. 2022. A comparison of multiple methods for mapping groundwater levels in the MU US sandy land, China[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 43: 101189.
- Ren J, Wang X, Shen Z, et al. 2018. Heat tracer test in a riparian zone: laboratory experiments and numerical modelling[J]. *Journal of Hydrology*, 563: 560–575.
- Richardson M, Kumar P. 2017. Critical zone services as environmental assessment criteria in intensively managed landscapes[J]. *Earth's Future*, 5(6): 617–632.
- Richter D D, Mobley M L. 2009. Monitoring earth's critical zone[J]. *Science*, 326(5956): 1067–1068.
- Sayde C, Buelga J B, Rodriguez-Sinobas L, et al. 2014. Mapping variability of soil water content and flux across 1–1000 m scales using the actively heated fiber optic method[J]. *Water Resources Research*, 50(9): 7302–7317.
- Sciences C O B R. 2001. Basic research opportunities in earth science[M]: National Academy Press.
- Shao M, Wang Y, Xia Y, et al. 2018. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the critical zone of the loess plateau: A review[J]. *Vadose Zone Journal*, 17(1): 1–8.
- Shao X M, Yan C R, Xu Z J. 2004. Progress in monitoring and simulation of soil moisture[J]. *Progress in Geography*, 23(3): 58–66(in Chinese with English abstract).
- Shen H J, Yan C R, Dai Y P. 2003. Progress and application of soil moisture monitoring and forecasting models[J]. *Ecologic Science*, 22(4): 366–370,376(in Chinese with English abstract).
- Sun A, Guo Z, Wu H, et al. 2017. Reconstruction of the vegetation distribution of different topographic units of the Chinese loess plateau during the Holocene[J]. *Quaternary Science Reviews*, 173: 236–247.
- Sun H, Wang Y, Zhao Y, et al. 2020. Assessing the value of electrical resistivity derived soil water content: Insights from a case study in the critical zone of the Chinese loess plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 589: 125132.
- Sun P P, Zhang M S, Jiang R J, et al. 2021. Deformation and failure mechanism of rainfall-induced shallow loess landslide[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(10): 1617–1625.
- Sun Y S, Chou R R, Deng X. 2014. Research development of mapping knowledge domains in China——Analysis based on CiteSpace II [J]. *Journal of Modern Information*, 34(1): 84–88(in Chinese with English abstract).
- Tang Q, Xu Y, Bennett S J, et al. 2015. Assessment of soil erosion using rusle and gis: a case study of the yangou watershed in the loess plateau, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 73(4): 1715–1724.
- Vose J M, Sun G, Ford C R, et al. 2011. Forest ecohydrological research in the 21st century: what are the critical needs?[J]. *Ecohydrology*, 4(2): 146–158.
- Wang H, Zhao W W, Jia L Z. 2021. Progress and prospect of soil water erosion research over past decade based on the bibliometrics analysis[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 19(1): 141–151(in Chinese with English abstract).
- Wang J, Zhao W, Jia L, et al. 2021. Soil desiccation trends after afforestation in the loess plateau of China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 21(2): 1165–1176.
- Wang Q, Fan J, Wang S, et al. 2019. Application and accuracy of cosmic-ray neutron probes in three soil textures on the loess plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 569: 449–461.
- Wang X C, Li J, Tahir M N, et al. 2011. Validation of the epic model using a long-term experimental data on the semi-arid loess plateau of China[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3/4): 976–986.
- Wang X, Hu G, Saito Y, et al. 2022. Did the modern yellow river form at

- the mid-pleistocene transition ?[J]. *Science Bulletin*, 67(15): 1603–1610.
- Wang Y Q, Hu W, Sun H, et al. 2024. Soil moisture decline in China's monsoon loess critical zone: More a result of land-use conversion than climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(15): e2322127121.
- Wang Y Q, Shao M A, Hu W, et al. 2016. Spatial variations of soil water content in the critical zone of the Chinese loess plateau[J]. *Earth and Environment*, 44(4): 391–397(in Chinese with English abstract).
- Wang Y Q, Shao M A, Sun H, et al. 2020. Response of deep soil drought to precipitation, land use and topography across a semiarid watershed[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 282: 107866.
- Wang Y S, Xia S T. 2018. A survey of random forests algorithms[J]. *Information and Communications Technologies*, 12(1): 49–55(in Chinese with English abstract).
- Wei Y T, Liu M H, Liu K, et al. 2021. Progress of multi-scale soil moisture monitoring[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 37(26): 140–145(in Chinese with English abstract).
- Williams J R, Jones C A, Dyke P T. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity.[J]. *Transactions of the Asae*, 27(1): 129–144.
- Wu P T, Zhao X N, Zhang B Q, et al. 2017. Exploitation of rainwater harvesting potential and its impact on regional ecological restoration over the loess plateau[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 36(8): 1–11(in Chinese with English abstract).
- Xiao B, Wang Q H, Zhao Y G, et al. 2011. Artificial culture of biological soil crusts and its effects on overland flow and infiltration under simulated rainfall[J]. *Applied Soil Ecology*, 48(1): 11–17.
- Yang Q, Luo W, Jiang Z, et al. 2016. Improve the prediction of soil bulk density by cokriging with predicted soil water content as auxiliary variable[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 16(1): 77–84.
- Ye L Y, Liu P, Huang J X, et al. 2020. Estimation of water consumption characteristics of typical ecosystems in the Daqing River Basin using WAVES model[J]. *China Rural Water and Hydropower*, (8): 35–39(in Chinese with English abstract).
- Zhang C, Tang Y, Xu X, et al. 2011. Towards spatial geochemical modelling: use of geographically weighted regression for mapping soil organic carbon contents in Ireland[J]. *Applied Geochemistry*, 26(7): 1239–1248.
- Zhang C, Wang Y, Jia X, et al. 2020. Variations in capacity and storage of plant-available water in deep profiles along a revegetation and precipitation gradient[J]. *Journal of Hydrology*, 581: 124401.
- Zhang G L, Shi Z, Zhu A X, et al. 2020. Progress and perspective of studies on soils in space and time[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 57(5): 1060–1070(in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Dawes W R, Hatton T J. 1996. Modelling hydrologic processes using a biophysically based model-application of waves to fife and hapex-mobilhy[J]. *Journal of Hydrology*, 185(1/4): 147–169.
- Zhang Y T, Xiao H B, Nie X D, et al. 2020. Evolution of research on soil Erosion at home and abroad in the past 30 years—Based on bibliometric analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 57(4): 797–810(in Chinese with English abstract).
- Zhen Q, Zheng J, Zhang X, et al. 2019. Changes of solute transport characteristics in soil profile after mining at an opencast coal mine site on the loess plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 665: 142–152.
- Zhu A N, Ji L Q, Zhang J B, et al. 2009. Research progress on soil moisture measurement via ground-penetrating radar[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 17(5): 1039–1044(in Chinese with English abstract).
- Zhu A X, Band L, Vertessy R, et al. 1997. Derivation of soil properties using a soil land inference model (solim)[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 61(2): 523–533.
- Zhu Q, Liao K H, Lai X M, et al. 2019. A review of soil water monitoring and modelling across spatial scales in the watershed[J]. *Progress in Geography*, 38(8): 1150–1158(in Chinese with English abstract).
- Zou C B, Turton D J, Will R E, et al. 2014. Alteration of hydrological processes and streamflow with Juniper (Juniperus Jirginiana) encroachment in a mesic grassland catchment[J]. *Hydrological Processes*, 28(26): 6173–6182.
- Zou J L, Shao M, Gong S H. 2011. Effects of different vegetation and soil types on profile variability of soil moisture[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 18(6): 12–17(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 常学尚, 常国乔. 2021. 干旱半干旱区土壤水分研究进展[J]. *中国沙漠*, 41(1): 156–163.
- 丁文斌, 王飞. 2022. 植被建设对黄土高原土壤水分的影响[J]. *生态学报*, 42(13): 5531–5542.
- 冯慧敏, 雷廷武, 张久文, 等. 2009. 美国水土保持法律法规简介[J]. *水土保持研究*, 16(3): 276–280.
- 贺缠生, 田杰, 张宝庆, 等. 2021. 土壤水文属性及其对水文过程影响研究的进展、挑战与机遇[J]. *地球科学进展*, 36(2): 113–124.
- 胡猛, 冯起, 席海洋. 2013. 遥感技术监测干旱区土壤水分研究进展[J]. *土壤通报*, 44(5): 1270–1275.
- 焦峰, 温仲明, 陈云明. 2005. 基于 GIS 的黄丘区土壤水分制图及其定量分析[J]. *水土保持研究*, 12(3): 129–131, 177.
- 焦峰, 温仲明, 陈云明, 等. 2006. 基于 gis 的安塞县土壤水分制图及其数量分析[J]. *中国水土保持科学*, 4(1): 75–80.
- 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 2019. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. *生态学报*, 39(20): 7398–7409.
- 廖凯华, 吕立刚. 2018. 东南湿润区坡面土壤水文过程研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 37(4): 476–484.
- 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 2017. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. *中国科学院院刊*, (1): 11–19.
- 卢爱刚, 索安宁, 张镭. 2011. 基于 SWAT 模型的黄土高原典型区水土流失格局模拟评价[J]. *水土保持研究*, 18(2): 57–61.
- 骆占斌, 樊军, 邵明安. 2022. 地球关键带基岩风化层生态水文研究进展[J]. *科学通报*, 67(27): 3311–3323.
- 彭新华, 王云强, 贾小旭, 等. 2020. 新时代中国土壤物理学主要领域进展与展望[J]. *土壤学报*, 57(5): 1071–1087.

- 乔新涛, 曹毅, 毕如田. 2019. 基于 AEA 法的黄土高原矿区复垦农田土壤含水率特征研究[J]. 土壤通报, 50(1): 63–69.
- 邵晓梅, 严昌荣, 徐振剑. 2004. 土壤水分监测与模拟研究进展[J]. 地理科学进展, 23(3): 58–66.
- 申慧娟, 严昌荣, 戴亚平. 2003. 农田土壤水分预测模型的研究进展及应用[J]. 生态科学, 22(4): 366–370, 376.
- 孙萍萍, 张茂省, 江睿君, 等. 2021. 降雨诱发浅层黄土滑坡变形破坏机制[J]. 地质通报, 40(10): 1617–1625.
- 孙雨生, 仇蓉蓉, 邓兴. 2014. 国内知识图谱研究进展——基于 citespace ii 的分析[J]. 现代情报, 34(1): 84–88.
- 王涵, 赵文武, 贾立志. 2021. 近 10 年土壤水蚀研究进展与展望: 基于文献计量的统计分析[J]. 中国水土保持科学 (中英文), 19(1): 141–151.
- 王奕森, 夏树涛. 2018. 集成学习之随机森林算法综述[J]. 信息通信技术, 12(1): 49–55.
- 王云强, 邵明安, 胡伟, 等. 2016. 黄土高原关键带土壤水分空间分异特征[J]. 地球与环境, 44(4): 391–397.
- 魏玉涛, 刘明欢, 刘可, 等. 2021. 多尺度土壤水监测研究进展[J]. 中国农学通报, 37(26): 140–145.
- 吴普特, 赵西宁, 张宝庆, 等. 2017. 黄土高原雨水资源化潜力及其对生态恢复的支撑作用[J]. 水力发电学报, 36(8): 1–11.
- 叶林媛, 刘攀, 黄俊雄, 等. 2020. 基于 WAVES 模型的大清河流域典型生态系统耗水特征分析[J]. 中国农村水利水电, (8): 35–39.
- 张甘霖, 史舟, 朱阿兴, 等. 2020. 土壤时空变化研究的进展与未来[J]. 土壤学报, 57(5): 1060–1070.
- 张宇婷, 肖海兵, 聂小东, 等. 2020. 基于文献计量分析的近 30 年国内外土壤侵蚀研究进展[J]. 土壤学报, 57(4): 797–810.
- 朱安宁, 吉丽青, 张佳宝, 等. 2009. 基于探地雷达的土壤水分测定方法研究进展[J]. 中国生态农业学报, 17(5): 1039–1044.
- 朱青, 廖凯华, 赖晓明, 等. 2019. 流域多尺度土壤水分监测与模拟研究进展[J]. 地理科学进展, 38(8): 1150–1158.
- 邹俊亮, 邵明安, 龚时慧. 2011. 不同植被和土壤类型下土壤水分剖面的分异[J]. 水土保持研究, 18(6): 12–17.