

doi: 10.12097/gbc.2022.12.011

县域尺度地球关键带分类框架与实证 ——以河南省西峡县为例

李潇¹, 吴克宁^{1,2*}, 刘亚男³, 钱家乘¹
LI Xiao¹, WU Kening^{1,2*}, LIU Ya'nan³, QIAN Jiacheng¹

1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083;

2. 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035;

3. 扬州大学商学院, 江苏 扬州 225125

1. College of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Land Consolidation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China;

3. School of Business, Yangzhou University, Yangzhou 225125, Jiangsu, China

摘要: 地球关键带分类有助于认知关键带的空间布局, 了解其发生和演化的区域差异性, 并可以作为观测和调查关键带的基础。为了延续大尺度地球关键带分类, 在分析关键带组成要素的基础上, 采用多层次划分法构建了一套小尺度关键带分类的框架, 并在 GIS 中以图层叠置法对河南省西峡县做了实证研究。建立了一套涵盖分类原则、分类指标的多层级地球关键带分类框架, 并将西峡县地球关键带划分为 28 个一级类型单元, 246 个二级类型单元和 722 个三级类型单元。这种划分可以提高对地球系统科学的整体认知, 对小尺度地球关键带的科学研究和自然资源综合管理也具有一定的参考意义。

关键词: 地球关键带; 类型单元; 县域; 西峡县; 河南

中图分类号: P3; P90 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)08-1336-10

Li X, Wu K N, Liu Y N, Qian J C. Classification framework and empirical study of Earth Critical Zone at small-scale: A case study of Xixia County, Henan Province. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(8): 1336-1345

Abstract: The classification of Earth Critical Zone is helpful to cognize the spatial distribution and understand the regional differences in the occurrence and evolution of Critical Zone. Besides, it is the basis for the observation and investigation of Critical Zone. To further study the existing large-scale Critical Zone classification, this study constructed a set of small-scale Critical Zone classification frameworks using a multi-level classification method. It made an empirical study of Xixia County in Henan Province by using the map overlay method in GIS. The research results showed a group of multi-level classification frameworks covering classification principles and indexes in the mountainous area, and the Critical Zone of Xixia County was divided into 28 first-level types, 246 second-level types, and 722 third-level types. This classification can improve the overall understanding of earth system science. It also has specific reference significance for scientific research and the comprehensive management of natural resources in the critical zones of the earth at different scales.

Key words: Earth Critical Zone; classification unit; county level; Xixia County; Henan Province

地球系统中与人类联系最密切的近地表部分, 强烈作用于地球系统, 给地表环境累积了一系列的称为地球关键带。随着“人类世”的进入, 人类活动 压力, 包括生态系统的健康程度持续下降, 区域环境

收稿日期: 2022-12-07; 修订日期: 2023-03-29

资助项目: 国家自然科学基金项目《区域土地类型划分与耕地资源适应性管理》(批准号: 42171261)和自然资源部科技发展司项目《地球关键带与自然资源管理战略研究》

作者简介: 李潇(1994-), 女, 在读博士生, 从事自然资源管理方面的研究。E-mail: lixiao@email.cugb.edu.cn

* 通信作者: 吴克宁(1963-), 男, 博士, 博士生导师, 从事自然资源管理方面的研究。E-mail: wukening@cugb.edu.cn

退化、重大灾害频发等现实问题,给人类社会进步与可持续发展带来了严峻挑战(刘彦随, 2020)。解决这些挑战需要一种新的、协同的科学方法,将理论和观察整合到广泛的学科中(National Research Council, 2001)。地球关键带科学建立了跨学科的联系,试图理解地球表面过程对气候和人类扰动的响应(Sullivan et al., 2017)。地球关键带(Earth Critical Zone, CZ)是地球系统科学发展的新概念,被定义为地球表面的薄层,从树冠顶部到含水层底部,支撑着几乎所有的人类活动(National Research Council, 2001)。理解、预测和管理地球关键带的环境过程是 21 世纪最紧迫的社会挑战之一(Banwart et al., 2011)。地球关键带科学的核心研究主题包括结构、过程、功能和演化(Rasmussen et al., 2011; Scarpone et al., 2016; Li et al., 2017)。这些研究可由地球关键带观测站(CZOs)及其网络提供的综合数据集所支持(Banwart et al., 2013)。目前,全球已建立了 60 多个较系统的地球关键带观测站(Giardino et al., 2015)。以监测为基础的研究活动大大增加,但大多局限于小尺度的结构、过程及其相互作用(Lü et al., 2019)。因此,需要建立协调的地球关键带观测站网络,理解区域形成和运作,并为人类提供经济服务和生命支持(Banwart et al., 2013)。

分类是分析系统形成和发展的途径,也是理解地球关键带系统的结构、功能、演变规律和空间分异特征的重要方式(李晓亮等, 2022)。地球关键带分类可以为观测站的成本效益排序和规划提供基石,推进地球关键带科学的发展(Lü et al., 2019)。此外,认识到关键带的区域变化也能改善对水平方向上地球关键带相互作用的理解和建模(Lü et al., 2019)。由于地表景观和气候类型差异所形成的不同地质-环境梯度,以及各种生态、地质和水文过程和人类活动程度的差异性,导致地球关键带在横向上具有高度异质性(蒲俊兵, 2022)。然而,在区域尺度上仍然缺乏关键带的系统分类体系,也没有足够的分类方法进行这方面的研究(Sullivan et al., 2017)。针对这些问题,Lü et al.(2019)在黄土高原区进行了地球关键带的类型研究,考虑了地质、生态、气候、社会经济等指标。张甘霖等(2021)也构建了一个关键带的分类体系,考虑了气候、成土母质、土壤类型、地下水、地貌、土地利用,并以中国为例进行了实证研究。这些分类对认识和理解中国地球关键带的分布特征提供

了科学依据(Rasmussen et al., 2011; 张甘霖等, 2021)。

地球关键带的结构和过程在时空上具有多尺度性(蒲俊兵, 2022)。地球关键带包含了广泛的时间和空间尺度,各种物理、化学和生物过程在不同的时空尺度上相互作用,从秒到千年,从单个分子到整个地球(Brantley et al., 2007)。目前地球关键带分类的研究涵盖了国家和区域尺度,但仍缺少对于小尺度(如县域)地球关键带分布的研究,难以满足在不同尺度上理解地球关键带的综合特征的要求。县是中国行政管理的基层单元,处于宏观规划和微观管理相衔接的交叉点上。县域尺度是地球关键带观测站利用和管理的最直接操作层,以县域为尺度开展地球关键带的类型划分对发展基于地球关键带的科学研究和自然资源综合管理具有重要作用。鉴于此,本次研究以县域为研究尺度,提出了地球关键带分类的原则、方法和指标,并以河南省西峡县为例进行了实证研究。研究结果可以延续国内已有的大尺度地球关键带的表征与归类,深入理解小尺度上地球关键带的空间分布特征。

1 地球关键带分类的框架

1.1 分类原则

地球关键带在横向上包括已经风化的松散层,还有植被、河流、湖泊、海岸带与浅海环境,在纵向上自植物冠层向下穿越了地表面、土壤层、非饱和的包气带、饱和的含水层,下边界通常为含水层的基岩底板(杨建锋等, 2014)。由于地域分异规律的存在(杨顺华等, 2021),关键带在横向上表现出异质性(曹建华等, 2018)。理解地球表层系统中各个要素的现状、演变过程和相互作用是实现关键带过程调控和资源可持续利用的必要前提(杨顺华等, 2021)。地球关键带的分类研究,是了解地球关键带的现状与演化结果一致性和变异性的主要途径,且需要遵循以下原则。

(1)发生性原则。地球关键带强调各要素之间的相互作用(朱永官等, 2015)。具体地,地球表层系统中的水、土壤、大气、生物、岩石等在地球内外部能量驱动下的相互作用和演变(杨顺华等, 2021)。如流域尺度上大气和植物之间、植物和土壤之间物质和元素循环的相互联系(Brantley et al., 2005; Richter et al., 2015)。由于关键带各构成要素的相互作用和影响,使不同地域空间内有不同的特征。而

地球关键带分类以这种自然发生性作为依据,根据其性质的相似性和差异性来划分类型,反映客观存在的地域差异。

(2)综合性原则。地球关键带科学的基本挑战包括整合关键带垂直深度的生物、水文、化学和物理过程的复杂相互作用(Banwart et al., 2013)。理解这些相互作用的复杂性对于提高我们对地球表面基本过程的认识至关重要,如陆地碳循环、矿物微生物相互作用及地质和大气对景观演化的控制(National Research Council, 2001)。因此,地球关键带的分类需要依据综合性的原则,考虑在各种过程的综合作用下,形成的关键带综合体的外部形态和内部特征,而不是只注意个别因素和过程作用下的形态和特征。

(3)主导性原则。地球关键带控制着能量、水和碳循环、营养物质和污染物的迁移和运输,以及大气成分,对维持地球上的生命至关重要(Brantley et al., 2007)。地球关键带的物质循环、水文、生态等过程所进行的方式和程度各异,导致了地球关键带的异质性(蒲俊兵, 2022)。各个自然要素和演化过程在地球关键带中的作用是不均衡的,在综合分析时需要确定起主要作用的关键因素。另外,由于不同区域的特点差异,起主导作用的因素也有所不同。

1.2 分类框架

1.2.1 分类层级

地球关键带是陆地生态系统中土壤圈及其与大气圈、生物圈、水圈和岩石圈进行物质迁移和能量交换的交汇区域(朱永官等, 2015)。大气圈管控着关键带系统的气候,太阳辐射、热量、降水等对地球表层气候形成具有控制作用(刘亚男等, 2022)。气候不仅可以改变地球表面的条件,也影响生物区系的分布(Keith et al., 2011; Hjort et al., 2015)。岩石圈的岩性及矿物质组成影响土壤和地下水的产生,是土壤母质的来源,对土壤性状有控制作用,也影响地下水资源的储藏条件与水质,并对地球关键带类型的演化有一定的作用(刘黎明, 2002)。生物圈中植物、微生物等生产者将土壤中的物质合成为植物量,经消费者消费后又又被微生物分解返回土壤(杨建锋等, 2014)。这五大圈层的相互作用,影响地球关键带的形成。

因此,本次研究综合考虑地球关键带的发生性,选择影响地球关键带分异的气候、地质、土壤、水文

和土地利用 5 个主导因素,以各因素在小尺度上一定周期内的相对稳定性(“较稳定—相对稳定—不稳定”),构建了涵盖 3 个层级的县域地球关键带的分类框架(图 1)。其中,气候是影响地球关键带最复杂和最持久的因素(张甘霖等, 2021),地质是地球表层系统的重要影响因素(马婉君等, 2022),且在一定时间内小尺度上气候和地质因素较稳定。土壤在自然状态下形成缓慢,在人为干扰下即使形成速度加快,但在一定时间内也是相对稳定的。而水文和土地利用因素在短时间内的变化较明显。

1.2.2 分类指标

地球关键带科学从系统科学的角度理解土壤与大气、生物、水、岩石等要素的相互作用(张甘霖等, 2019)。地球关键带的要素是其空间格局变化的动因,也是划分系统的基础(李晓亮等, 2022)。而指标反映因素的特征,确定合适的指标是分类科学性的保证(王建国等, 2001)。各分类层级的指标见图 1。

一级:以气候区划结果和地质岩性作为地球关键带一级分类的指标。气候通过水热条件来影响其形成与演化,例如温度状况将影响岩石和风化壳中矿物的风化、有机质的合成与分解等;降雨能够直接影响系统中物质的迁移(张甘霖等, 2021)。降水、太阳辐射、气温、风速、湿度等衡量气候变化的指标众多,且单一气候指标难以反映气候的整体变化。而气候区划可以从系统的角度深入了解气候状况的区域分异规律和各地的气候特征(郑景云等, 2010)。地质图是区域地质和大地构造研究的重要基础资料,可以表示区域地质格局、岩石地层划分与展布特征、不同构造单元和构造层的相互关系等(郭召杰, 2012)。

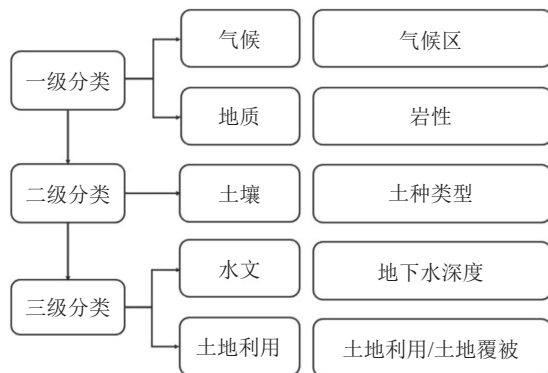


图 1 县域尺度地球关键带分类框架

Fig. 1 Classification framework of Earth Critical Zone at county scale

二级: 在地球关键带一级分类的基础上增加相对稳定的土种类型, 作为二级分区的指标。土壤是地球关键带的核心组成部分, 其过程是控制关键带物质、能量和信息流动与转化的重要节点(National Research Council, 2001; 朱永官等, 2015)。而土壤的形成是岩石经风化、搬运、堆积等过程在地表形成疏松多孔的成土母质, 成土母质再经物理、化学及生物作用的结果(张甘霖等, 2021)。土种是土壤发生分类系统中的基层分类单元, 它是出于相同或相似景观部位及其类似的水热条件, 具有相对一致的土壤剖面形态特征和理化生物性质相似的一群土壤实体(施建平, 2016)。且土种能更详细地反映小尺度土壤的信息。

三级: 以地球关键带二级分类的结果为基础, 增加地下水深度和土地利用/土地覆被作为三级分类的指标。地下水在陆地表层生态水文循环中扮演着重要角色(骆占斌等, 2022)。水分的入渗和侧向流动除土壤层外, 以活塞流和优先流渗入的雨水能够穿过破碎的基岩风化层, 聚集在未风化基岩界面形成地下水, 然后横向流向邻近河道, 在蒸散发和径流之间的分配起到调节作用(Salve et al., 2012)。地下水深度的分级参考有关学者对中国(张甘霖等, 2021)和华北平原地区(马婉君等, 2022)地球关键带的分类研究, 将其分为 3 级: 浅埋区, 0~5 m; 中深埋区, 5~20 m; 深埋区, ≥ 20 m。地球关键带类型的划分框架涉及地理多样性、生态系统、气候、人类社会等多个方面(胡健等, 2021)。自人类文明发展以来, 地球表面发生了很大变化, 且正在以指数的形式加速进行(安芷生等, 2001)。不同土地利用/土地覆被类型对关键带分类影响明显, 尽管在不同的分类系统中存在差异, 通常可包括耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地、冰川、永久积雪等类型。

2 实证研究

本次研究以位于山地区域的河南省西峡县为例, 应用上述地球关键带分类的框架对地球关键带群体进行类型的划分与归纳。

2.1 研究区

伏牛山位于中国河南省西南部, 属秦岭山脉东段支脉, 构成了黄河、淮河和长江三大水系的重要分水岭。而西峡县位于伏牛山腹心地带, 属于典型的

山地区域, 其在行政区划上属于河南省西南部, 南阳盆地西北部, 东经 $111^{\circ}01' \sim 111^{\circ}46'$, 北纬 $33^{\circ}05' \sim 33^{\circ}48'$ 。西峡县处于亚热带向暖温带的过渡地带, 年均气温 15.1°C , 年均降雨量 830 mm 左右。辖区内以中山、低山为主, 且整个区域地势由西北向东南倾斜, 西北高, 东南低。西峡属长江流域汉江水系, 水量充沛, 河流较多。根据第二次全国土壤普查结果, 全县可分为潮土、黄棕壤、棕壤、水稻土和紫色土 5 个土类, 下分 9 个亚类, 25 个土属, 67 个土种。全县森林覆盖率 81%, 被国家林业局命名为“中国名优特经济林——猕猴桃之乡”。

2.2 数据来源与处理

使用的多源数据包括: ① 气候区划数据来源于郑景云(2013)最新研究的中国气候区划, 该气候区划综合考虑了气温、降雨、干燥度等因素, 客观反映了中国气候区划格局; ② 地质数据来源于中国地质科学院地质研究所的 1:50 万《河南省地质图》, 该数据涵盖了全省地层、岩浆岩、构造和矿产资料; ③ 土壤类型数据为全国第二次土壤普查西峡县土种图, 来源于中国农业科学院农业资源与农业区划研究所; ④ 地下水深度数据来源于水利专业知识服务系统(<http://mwr.ckcest.cn>)地下水埋深图; ⑤ 土地利用/土地覆被的数据为中国研制的 30 m 空间分辨率全球地表覆盖数据(<http://www.globallandcover.com/>) Global land 30 2020 版, 该数据使用 30 m 多光谱影像, 总体精度为 85.72%, Kappa 系数 0.82。

数据处理的具体流程为: 首先将所有因素的数据转换为矢量格式; 其次, 对各因素的数据图幅进行标准化处理, 即以西峡县最新的行政区划范围对各因素的图层进行裁剪, 保证边界的一致性; 然后, 根据上文分类框架(图 1), 将各因素对应的图层依次进行相交叠加和相同属性图斑的融合处理; 最终得到地球关键带的三级分类。以上操作均在 ArcGIS 软件中完成。

3 结果与讨论

依据上文分类框架, 将西峡县地球关键带划分为 28 个一级类型区, 246 个二级类型区和 722 个三级类型区, 每个类型单元内有相同的属性和特点。各层级的地球关键带分布见图 2、图 3 和图 4。地球关键带类型的命名采用分类因素类型联名法, 每个层级之间用“-”连接, 例如三级类型“暖温带半湿润

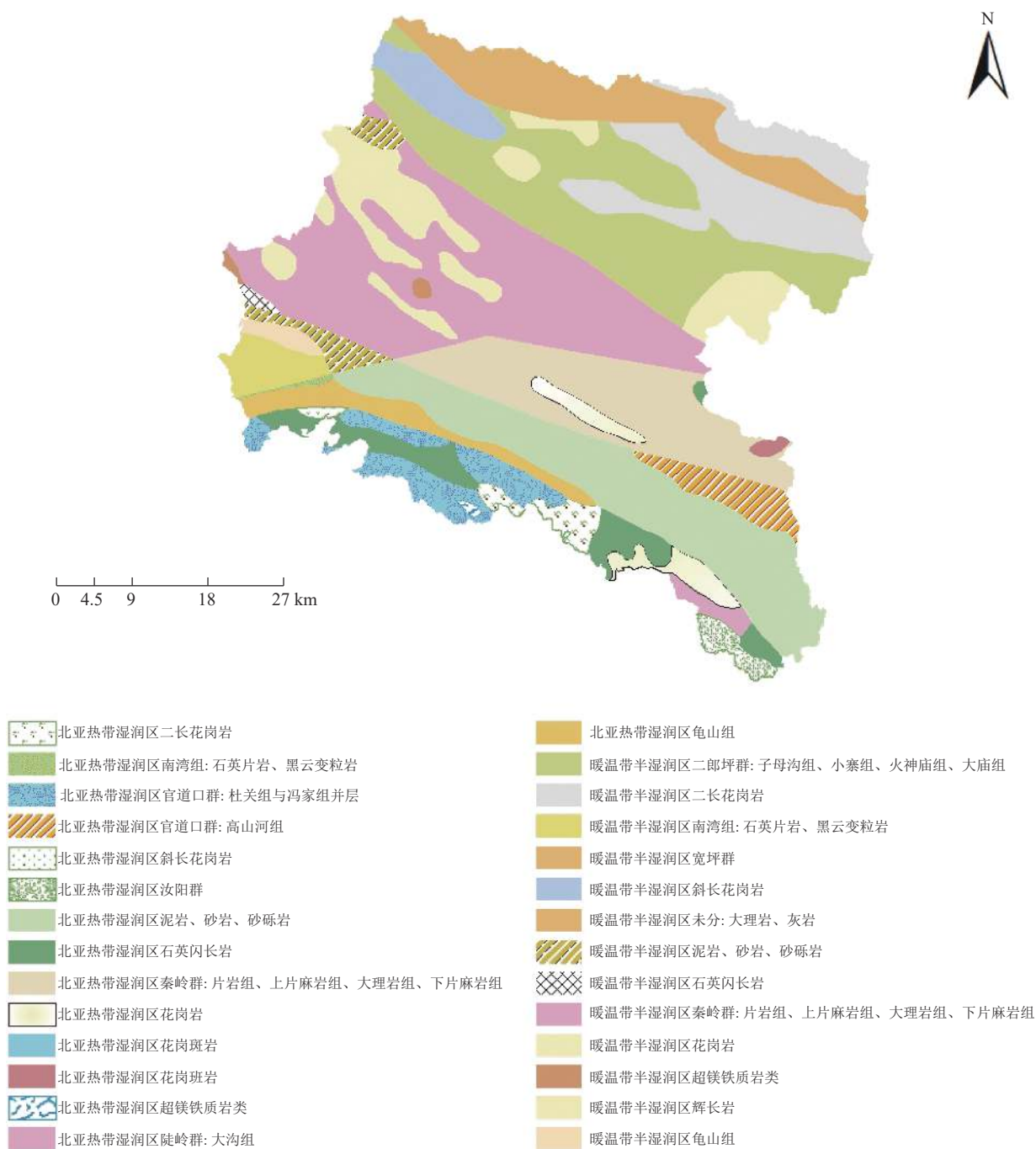


图2 西峡县一级关键带分区

Fig. 2 Subdivision of first-level Earth Critical Zone in Xixia County

区二长花岗岩-中砾质薄层淡岩黄砂石土-深层地下水林地”。

地球关键带一级类型区考虑了气候和岩性,其中西峡县面积占比较大的关键带类型包括暖温带半湿润区秦岭群:片岩组、上片麻岩组、大理岩组、下片麻岩组;暖温带半湿润区二郎坪群:子母沟组、小寨组、火神庙组、大庙组;北亚热带湿润区泥岩、砂

岩、砂砾岩;北亚热带湿润区秦岭群:片岩组、上片麻岩组、大理岩组、下片麻岩组。这4类关键带类型在空间布局上相对集中连续,且占区域总面积的50%以上。其中,前2类主要分布在研究区西南部,后2类主要分布在研究区南部区域。

地球关键带二级类型区在一级类型区的基础上叠加了土种类型,因此其分类结果的空间布局与一

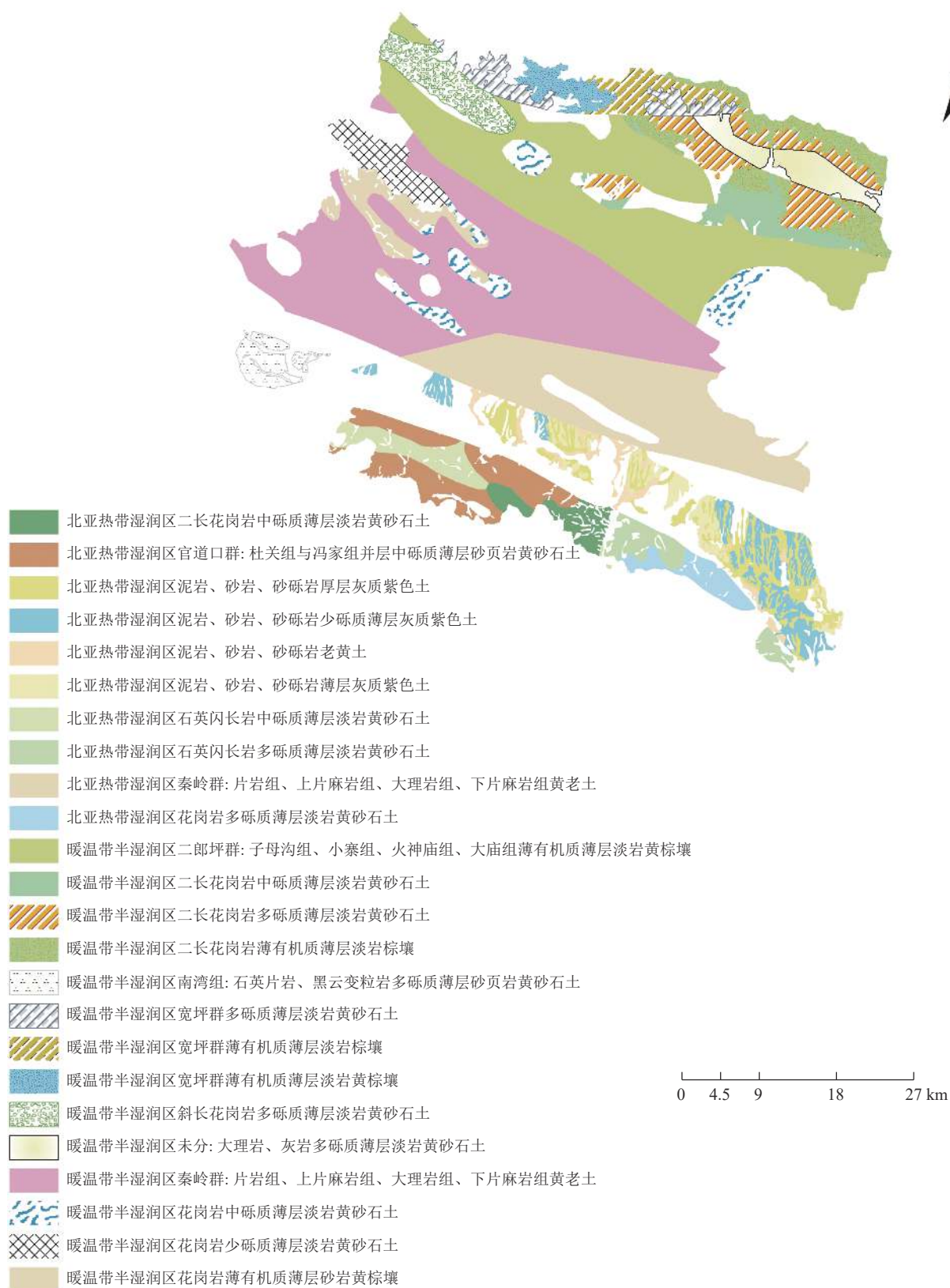


图 3 西峡县二级关键带分区(面积占比前 75% 的类型)

Fig. 3 Subdivision of second-level Earth Critical Zone in Xixia County

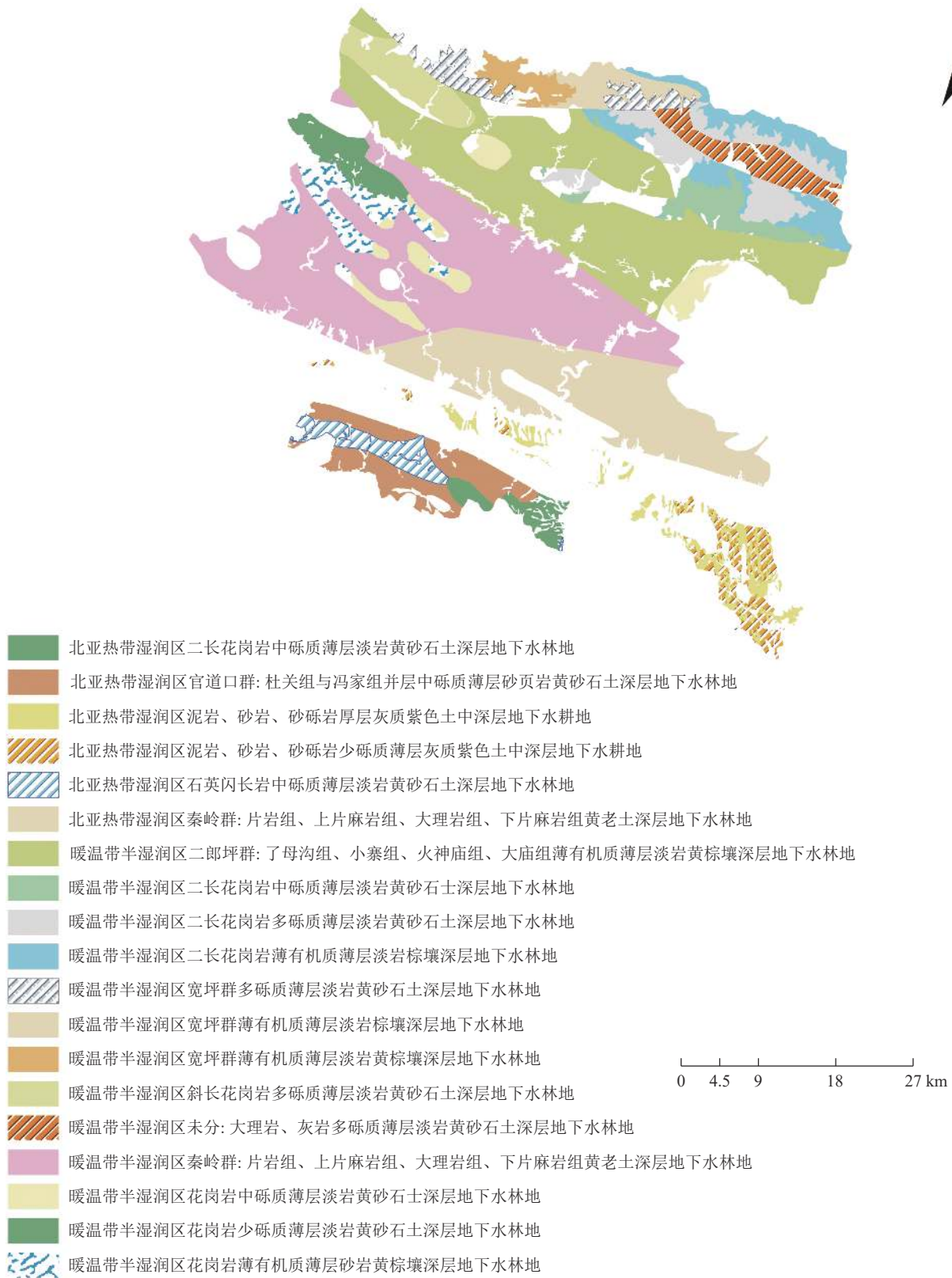


图4 西峡县三级关键带分区(面积占比前 65% 的类型)

Fig. 4 Subdivisions of the third-level Earth Critical Zone in Xixia County

级类型区有较高的相似性。其中,二级关键带分区的主要类型为暖温带半湿润区秦岭群:片岩组、上片麻岩组、大理岩组、下片麻岩组-黄老土;暖温带半湿润区二郎坪群:子母沟组、小寨组、火神庙组、大庙组-薄有机质薄层淡岩黄棕壤;北亚热带湿润区秦岭群:片岩组、上片麻岩组、大理岩组、下片麻岩组-黄老土;暖温带半湿润区二长花岗岩-薄有机质薄层淡岩棕壤。研究发现,研究区域的一级关键带类型中的土壤类型主要为薄有机质薄层淡岩黄棕壤、棕壤及老黄土,这 4 个二级类型区占西峡县总面积的 45% 左右,在区域内优势度较高。

在地球关键带二级类型的基础上,通过叠加地下水 和 土 地 利 用/土 地 覆 被 数 据,得 到 三 级 地 球 关 键 带 分 类。其中,面积占比前 65% 的三级关键带类型及其地理位置见表 1。可以看到,暖温带半湿润区秦岭群:片岩组、上片麻岩组、大理岩组、下片麻岩组-黄老土-深层地下水林地;暖温带半湿润区二郎坪群:子母沟组、小寨组、火神庙组、大庙组-薄有机质

薄层淡岩黄棕壤-深层地下水林地;北亚热带湿润区秦岭群:片岩组、上片麻岩组、大理岩组、下片麻岩组-黄老土-深层地下水林地,为区域最主要的 3 种关键带类型,且面积占比均大于 5%,具有较高的优势度。在地球关键带三级类型内,深层地下水和林地分别为区域主要的地下水和土地覆被类型。

地球关键带中的物理、化学和生物过程均与人类活动密切相关,且在不同的地理区域起主导作用的环境因子也有所不同(张甘霖等, 2021)。在本次研究中气候和地质岩性因素决定了小尺度地球关键带类型在空间布局上的主要差异,而土壤、地下水和土地利用/土地覆被等因素对关键带类型的细分起到了作用。上文提出的分类体系综合考虑了陆地表层系统五大圈层的主导因素,是在小尺度上对地球关键带的表征与归类的科学尝试,可以在县域进行普遍性推广。

地球关键带分类结果可用来指导地球关键带观测站点的建立和区域自然资源管理工作。例如,地

表 1 面积占比前 65% 的地球关键带三级类型区划分结果

Table 1 Results of the classification of the third-level of Earth Critical Zone with the top 65% area

序号	地球关键带三级类型名称	地理位置	面积/km ²	占比
1	暖温带半湿润区秦岭群:片岩组、上片麻岩组、大理岩组、下片麻岩组-黄老土-深层地下水林地	西南部	575.28	16.70%
2	暖温带半湿润区二郎坪群:子母沟组、小寨组、火神庙组、大庙组-薄有机质薄层淡岩黄棕壤-深层地下水林地	北部	479.80	13.93%
3	北亚热带湿润区秦岭群:片岩组、上片麻岩组、大理岩组、下片麻岩组-黄老土-深层地下水林地	东南部	287.59	8.35%
4	暖温带半湿润区二长花岗岩-薄有机质薄层淡岩棕壤-深层地下水林地	北部	104.08	3.02%
5	北亚热带湿润区官道口群:杜关组与冯家组并层-中砾质薄层砂页岩黄砂石土-深层地下水林地	南部	98.97	2.87%
6	暖温带半湿润区二长花岗岩-多砾质薄层淡岩黄砂石土-深层地下水林地	东北部	96.81	2.81%
7	暖温带半湿润区花岗岩-中砾质薄层淡岩黄砂石土-深层地下水林地	中部	71.71	2.08%
8	暖温带半湿润区斜长花岗岩-多砾质薄层淡岩黄砂石土-深层地下水林地	西北部	62.69	1.82%
9	暖温带半湿润区二长花岗岩-中砾质薄层淡岩黄砂石土-深层地下水林地	东北部	58.46	1.70%
10	暖温带半湿润区未分:大理岩、灰岩-多砾质薄层淡岩黄砂石土-深层地下水林地	东北部	57.82	1.68%
11	北亚热带湿润区泥岩、砂岩、砂砾岩-厚层灰质紫色土-中深层地下水耕地	东南部	56.79	1.65%
12	暖温带半湿润区花岗岩-薄有机质薄层砂岩黄棕壤-深层地下水林地	西南部	54.83	1.59%
13	暖温带半湿润区花岗岩-少砾质薄层淡岩黄砂石土-深层地下水林地	中西部	49.45	1.44%
14	北亚热带湿润区泥岩、砂岩、砂砾岩-少砾质薄层灰质紫色土-中深层地下水耕地	南部	46.51	1.35%
15	暖温带半湿润区宽坪群-多砾质薄层淡岩黄砂石土-深层地下水林地	北部	45.45	1.32%
16	暖温带半湿润区宽坪群-薄有机质薄层淡岩棕壤-深层地下水林地	北部	42.74	1.24%
17	北亚热带湿润区石英闪长岩-中砾质薄层淡岩黄砂石土-深层地下水林地	南部	41.93	1.22%
18	暖温带半湿润区宽坪群薄有机质-薄层淡岩黄棕壤-深层地下水林地	北部	34.06	0.99%
19	北亚热带湿润区二长花岗岩-中砾质薄层淡岩黄砂石土-深层地下水林地	南部	30.96	0.90%

球关键带观测站点的建立需考虑覆盖所有的关键带类型,并在面积较大的类型内加密布局。另外,以地球关键带类型为单元开展自然资源调查工作,可以综合区域自然资源的特性、增强自然条件的认知。对于区域占比较大的关键带类型,可以作为生态保护和修复的重点区。对于类型相似的关键带分区,可以根据国土空间的管理工作需要统一进行管理。

西峡县海拔 1000 m 以上中山山地约占 42%,2020 年 85% 以上的土地利用/土地覆被类型为林地,山丘区地下水资源量约 $20636 \times 10^4 \text{ m}^3$ 且 90% 左右为深层地下水。本文作为一个示例性研究,在地球关键带的三级分类中选取了仅地下水深度和土地利用/土地覆被 2 个指标,可能造成地球关键带三级分类的结果分异性较小。因此,在地球关键带的分类中,三级指标的选取需结合区域实际和服务目标进行,分类指标的全面性和指标分级的科学性对结果的影响较大,这应该是地球关键带分类需要重点关注的内容。

4 结 论

本次研究是在地球系统科学理论指导下的地球关键带分类的理论和实践研究,主要结论如下。

(1) 针对目前关键带的表征和归类缺乏小尺度研究的问题,本文以县域尺度为研究对象,提出了地球关键带分类需要遵循发生性、综合性和主导性的原则。

(2) 建立了综合考虑陆地表层大气圈、岩石圈、土壤圈、水圈和生物圈五大圈层中对关键带的形成和演化起主导作用的因素的三级分类框架。

(3) 在构建分类框架的基础上,以河南省西峡县为例进行了实证研究。研究结果为延续中国已有的关键带分类体系,深入理解区域内关键带的空间分布特征提供理论和实践依据,也可为小尺度关键带观测网络的布局 and 规划提供参考。

References

- An Z S, Fu C B. 2001. The progress in global change science[J]. *Advance in Earth Sciences*, (5): 671–680(in Chinese with English abstract).
- Banwart S A, Chorover J, Gaillardet J, et al. 2013. Sustaining Earth's critical zone basic science and interdisciplinary solutions for global challenges[M]. Sheffield: University of Sheffield.
- Banwart S, Bernasconi S M, Bloem J, et al. 2011. Soil processes and functions in critical zone observatories: Hypotheses and experimental design[J]. *Vadose Zone Journal*, 10(3): 974–987.
- Brantley S L, Goldhaber M B, Ragnarsdottir K V. 2007. Crossing disciplines and scales to understand the critical zone[J]. *Elements*, 3(5): 307–314.
- Brantley S L, White T S, White A F. 2005. Frontiers in exploration of the critical zone: Report of a workshop sponsored by the NSF Newark [R].
- Cao J H, Yang H, Zhang C L, et al. 2018. Characteristics of structure and material cycling of the karst critical zone in Southwest China[J]. *Geological Survey of China*, 5(5): 1–12(in Chinese with English abstract).
- Giardino J R, Houser C. 2015. Principles and dynamics of the critical zone [M]. Elsevier.
- Guo Z J. 2012. A review on the Paleozoic tectonic evolution of northern Xinjiang and a discussion on the important role of geological maps in tectonic study[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1054–1060(in Chinese with English abstract).
- Hjort J, Gordon J E, Gray M, et al. 2015. Why geodiversity matters in valuing nature's stage[J]. *Conservation Biology*, 29(3): 630–639.
- Hu J, Hu J J, Lü Y H. 2021. Spatial variation of the relationship between annual runoff and sediment yield and land uses based on the regional critical zone differentiation in the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 41(16): 6417–6429(in Chinese with English abstract).
- Keith D A. 2011. Relationships between geodiversity and vegetation in southeastern Australia[C]//Proceedings of the Linnean Society of New South Wales: 5–26.
- Li L, Maher K, Navarre-Sitchler A, et al. 2017. Expanding the role of reactive transport models in critical zone processes[J]. *Earth-Science Reviews*, 165: 280–301.
- Li X L, Wu K N, Feng Z, et al. 2022. Research progress of land surface system classification: From land type to Earth's critical zone type[J]. *Progress in Geography*, 41(3): 531–542 (in Chinese with English abstract).
- Liu L M. 2002. Land resource management[M]. Beijing: China Agricultural University Press (in Chinese).
- Liu Y N, Wu K N, Li X L, et al. 2022. Classification of land types at provincial level based on the goal of black land protection: A case study of Heilongjiang Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 42(8): 1348–1359 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S. 2020. Modern human–earth relationship and human–earth system science[J]. *Scientia Geographica Sinica*. 40(8): 1221–1234 (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: 3311–3323 (in Chinese with English abstract).
- Lü Y H, Hu J, Fu B J, 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 W J, Min L L, Qi Y Q, et al. 2022. Classification of agricultural critical zones in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 30(5): 769–778 (in Chinese with English abstract).
- National Research Council. 2001. Basic research opportunities in Earth

- science[M]. Washington DC: National Academy Press.
- Pu J B. 2022. Earth's critical zone and karst critical zone: Structure, characteristic and bottom boundary[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(5): 230–241 (in Chinese with English abstract).
- Rasmussen C, Troch P A, Chorover J, et al. 2011. An open system framework for integrating critical zone structure and function[J]. *Biogeochemistry*, 102(1): 15–29.
- Richter D B, Billings S A. 2015. 'One physical system': Tansley's ecosystem as Earth's critical zone[J]. *New Phytologist*, 206(3): 900–912.
- Salve R, Rempe D M, Dietrich W E. 2012. Rain, rock moisture dynamics, and the rapid response of perched groundwater in weathered, fractured argillite underlying a steep hillslope[J]. *Water Resources Research*, 48(11): 1–25.
- Scarpone C, Schmidt M G, Bulmer C E, et al. 2016. Modelling soil thickness in the critical zone for Southern British Columbia[J]. *Geoderma*, 282: 59–69.
- Sullivan P L, Wymore A S, McDowell M. 2017. New Opportunities for Critical Zone Science[R]. Arlington, VA: 2017 CZO Arlington Meeting White Booklet.
- Shi J P, Song G., 2016. Soil type database of China: A nationwide soil dataset based on the Second National Soil Survey[J]. *China Scientific Data*, (2): 1–12(in Chinese with English abstract).
- Wang J G, Yang L Z, Shan Y H, 2001. Application of fuzzy mathematics to soil quality evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, (2): 176–183(in Chinese with English abstract).
- Yang J F, Zhang C G. 2014. Earth's critical zone: A holistic framework for geo-environmental researches[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 41(3): 98–104,110(in Chinese with English abstract).
- Yang S H, Zhang G L. 2021. What are Earth's key zones[J]. *Science*, 73(5): 33–36,4 (in Chinese).
- Zhang G L, Zhu Y G, Shao M A. 2019. Understanding sustainability of soil and water resources in a critical zone perspective[J]. *Science China Earth Sciences*, 62: 1716–1718 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G L, Song X D, Wu K N. 2021. A classification scheme for Earth's critical zones and its application in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 64(10): 1709–1720 (in Chinese with English abstract).
- Zheng J Y, Yin Y H, Li B Y. 2010. A new scheme for climate regionalization in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 65(1): 3–12 (in Chinese with English abstract).
- Zheng J Y, Bian J J, Ge Q S, et al. 2013. The climate regionalization in China for 1951–1980 and 1981–2010[J]. *Geographical Research*, 32(6): 987–997 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y G, Li G, Zhang G L, et al. 2015. Soil security: From Earth's critical zone to ecosystem services[J]. *Acta Geographica Sinica*, 70(12): 1859–1869 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安芷生, 符淙斌. 2001. 全球变化科学的进展[J]. *地球科学进展*, (5): 671–680.
- 曹建华, 杨慧, 张春来, 等. 2018. 中国西南岩溶关键带结构与物质循环特征[J]. *中国地质调查*, 5(5): 1–12.
- 郭召杰. 2012. 新疆北部大地构造研究中几个问题的评述——兼论地质图在区域构造研究中的重要意义[J]. *地质通报*, 31(7): 1054–1060.
- 胡健, 胡金娇, 吕一河. 2021. 基于黄土高原关键带类型的土地利用与年径流产沙关系空间分异研究[J]. *生态学报*, 41(16): 6417–6429.
- 李晓亮, 吴克宁, 冯喆, 等. 2022. 陆地表层系统分类研究进展——从土地类型到地球关键带类型[J]. *地理科学进展*, 41(3): 531–542.
- 刘黎明. 2002. 土地资源学[M]. 北京: 中国农业大学出版社.
- 刘亚男, 吴克宁, 李晓亮, 等. 2022. 基于黑土地保护目标的省级尺度土地类型划分研究——以黑龙江省为例[J]. *地理科学*, (8): 1348–1359.
- 刘彦随. 2020. 现代人地关系与入地系统科学[J]. *地理科学*, 40(8): 1221–1234.
- 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.
- 马婉君, 闵雷雷, 齐永青, 等. 2022. 华北平原农田关键带分类研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 30(5): 769–778.
- 蒲俊兵. 2022. 地球关键带与岩溶关键带: 结构、特征、底界[J]. *地质科技通报*, 41(5): 230–241.
- 施建平, 宋歌. 2016. 中国土种数据库——基于第二次土壤普查的全国性土壤数据集[J]. *中国科学数据*, (2): 1–12.
- 王建国, 杨林章, 单艳红. 2001. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究[J]. *土壤学报*, (2): 176–183.
- 杨建锋, 张翠光. 2014. 地球关键带: 地质环境研究的新框架[J]. *水文地质工程地质*, 41(3): 98–104,110.
- 杨顺华, 张甘霖. 2021. 什么是地球关键带[J]. *科学*, 73(5): 33–36,4.
- 张甘霖, 朱永官, 邵明安. 2019. 地球关键带过程与水土资源可持续利用的机理[J]. *中国科学: 地球科学*, 49(12): 1945–1947.
- 张甘霖, 宋效东, 吴克宁. 2021. 地球关键带分类方法与中国案例研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 51(10): 1681–1692.
- 郑景云, 尹鹤, 李炳元. 2010. 中国气候区划新方案[J]. *地理学报*, 65(1): 3–12.
- 郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 2013. 中国 1951—1980 年及 1981—2010 年的气候区划[J]. *地理研究*, 32(6): 987–997.
- 朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 2015. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. *地理学报*, 70(12): 1859–1869.