

doi: [10.12097/gbc.2023.08.035](https://doi.org/10.12097/gbc.2023.08.035)

山丘区地表基质空间异质性特征及其对植被生态影响

祝晓松¹, 裴小龙^{1,2*}, 王伟¹, 张中跃¹, 孙伟涛¹, 倪舒博¹, 公为鑫¹

ZHU Xiaosong¹, PEI Xiaolong^{1,2*}, WANG Wei¹, ZHANG Zhongyue¹, SUN Weitao¹, NI Shubo¹, GONG Weixin¹

1. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065000;

2. 中国地质调查局梨树黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 河北 廊坊 065000

1. Langfang Comprehensive Survey Center of Natural Resources, China Geological Survey, Langfang 065000, Hebei, China;

2. Lishu Black Soil Earth's Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station, China Geological Survey, Langfang 065000, Hebei, China

摘要: 地表基质是地球表层孕育和支撑森林、草原、水、湿地等各类自然资源的基础物质, 受地球关键带空间结构、元素特征等因素的影响, 山丘区地表基质呈现明显的空间异质性特征, 并显著影响着所属植被的空间分布和生态演化。研究地表基质空间异质性特征及其对植被生态的影响机理, 对于进一步认识地球关键带结构及地表作用规律, 支撑国土空间生态环境修复具有重要意义。以宁波山丘区地表基质为研究对象, 采取剖面研究和样品测试的方法, 从地表基质空间结构和元素特征角度, 对花岗岩、流纹岩和玄武岩3类典型地表基质空间异质性进行了分析。研究发现, 花岗岩类具有土质粗、透水性强等特点, 流纹岩类具有土质较粗、浅表透气好等特点, 玄武岩类具有土质细、通气性差等特点。此外, 花岗岩类主量和微量元素较缺乏, 流纹岩类富含Mo和Zn, 玄武岩类富含Fe、Mg、Co、Cu、Zn等元素, 且玄武岩CIA值明显高于花岗岩和流纹岩。结果表明, 山丘区地表基质空间异质性主要受基岩的结构和元素组成影响, 并对植被生长产生明显的生态效应。地表基质的空间结构主要影响水分的分布与运移, 元素特征影响着养分的分布状况, 由此引起的水分和养分的空间分布和丰度差异直接影响着植被生长。

关键词: 宁波山丘区; 地表基质; 空间异质性; 空间结构; 元素分异; 植被生态

中图分类号: P622.1; P96 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2024)09-1544-11

Zhu X S, Pei X L, Wang W, Zhang Z Y, Sun W T, Ni S B, Gong W X. Spatial heterogeneity characteristics of ground substrate in hilly area and its impact on vegetation ecology. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(9): 1544–1554

Abstract: The ground substrate is the basic material of the Earth's surface layer that nurtures and supports various natural resources such as forests, grasslands, water and wetlands, etc. Influenced by the spatial structure of the Earth's key zones and elemental characteristics, the ground substrate of the hill area presents obvious spatial heterogeneity characteristics, and significantly influences the spatial distribution of the vegetation belonging to it and its ecological evolution. The study of the spatial heterogeneity characteristics of the ground substrate and its impact on vegetation ecology is of great significance for further understanding the structure and surface process laws of the Earth's critical zone, and supporting the restoration of the national territorial space ecological environment. Taking the ground substrate of Ningbo hill area as the research object, this paper analyzes the spatial heterogeneity of three typical surface matrices, namely granite, rhyolite and basalt, from the perspective of the spatial structure and elemental characteristics of the ground substrate by adopting the methods of sectional research and sample testing. It was found that the granite group is characterized by

收稿日期: 2023-08-25; 修订日期: 2023-11-17

资助项目: 自然资源综合调查指挥中心科创基金项目《黑河下游地下水-土壤-植被相互作用及生态效应研究》(编号: KC20220010)、中国地质调查局项目《长三角宁波地区自然资源地表基质层调查》(编号: ZD20220118)

作者简介: 祝晓松(1988-), 男, 工程师, 从事自然资源综合调查研究。E-mail: 986671669@qq.com

* 通信作者: 裴小龙(1988-), 男, 硕士, 工程师, 从事自然资源调查监测方面的研究。E-mail: 457934728@qq.com

coarse soil and high permeability, the rhyolite group is characterized by coarser soil and good shallow-surface permeability, and the basalt group is characterized by fine soil and poor aeration. In addition, the main trace elements of granite type are deficient, rhyolite type is rich in Mo and Zn, basalt type is rich in Fe, Mg, Co, Cu and Zn, and the *CIA* value of basalt is significantly higher than that of granite and rhyolite. The results showed that the spatial heterogeneity of the ground substrate in the hilly area was mainly influenced by the structure and elemental composition of the bedrock, and had obvious ecological effects on the growth of vegetation. The spatial structure of the ground substrate mainly affects the distribution and transportation of water, and the elemental characteristics affect the distribution of nutrients, and the resulting differences in the spatial distribution and abundance of water and nutrients have a direct impact on the growth of vegetation.

Key words: Ningbo hill area; ground substrate; spatial heterogeneity; spatial structure; element differentiation; vegetation ecology

为有效履行中国自然资源科学管理需要, 推进国土空间现代化治理, 自然资源部于 2020 年印发了《自然资源调查监测体系构建总体方案》, 提出地表基质的概念, 地表基质是孕育和支撑森林、草原、水、湿地等各类自然资源的基础物质(自然资源部, 2020a)。按照地表基质层、地表覆盖层、管理层三大数据层, 自然资源部明确了自然资源统一调查监测的思路, 并全面启动了全国地表基质调查工作。作为一项新型探索性工作, 一些学者从地表基质的内涵、分类方案、调查思路、技术方法等方面进行了深入思考和研究(葛良胜等, 2020; 殷志强等, 2020; 贾磊等, 2022; 李响等, 2023), 为地表基质相关研究提供了借鉴和参考。地表基质作为地球关键带的重要组成部分, 在自然资源多要素物质循环和能量转移转化中起着重要的关键纽带作用, 也是植被根系所能触达的基础物质, 对植被生长具有复杂的作用过程(Richter et al., 2009; Banwart et al., 2013; 丁永建等, 2014; 张甘霖等, 2021)。受成土母质、气候、地形等因素影响, 地表基质结构特征、元素组成、养分含量等存在一定的空间分布差异, 表现出明显的空间异质性特征, 进而影响植被群落的组成、构建和生物量(李新荣, 2005; 邵方丽, 2012; 赵倩等, 2020)。由于地表基质空间异质性的复杂性, 目前对于地表基质与植被生长作用机理的认识依然不够(姚晓峰等, 2022; 杨顺华等, 2024), 造成山丘区土地的不合理开发、林地衰退、水土流失等一系列资源环境问题, 严重制约着自然资源的可持续利用和发展(刘硕等, 2019; 赵辛金等, 2020)。因此, 充分研究地表基质空间异质性特征, 了解地表基质养分组成和分布规律, 阐明地表基质对植被生态的影响机理, 对于进一步认识地球关键带结构及地表作用规律, 支撑国土空间生态环境修复具有重要意义(马腾等, 2020; 殷志强等, 2022)。

本文结合近年地表基质层调查工作取得的认

识, 以宁波山丘区地质基质为研究对象, 采取剖面研究和样品测试的方法, 从地表基质层空间结构异质性和元素特征异质性角度, 分析了地表基质异质性产生的原因和影响因素, 阐述了地表基质空间异质性对植被群落构建和空间分布的影响机理, 探讨了 3 种典型地表基质对植被生长的适宜性条件, 可为植被生态系统修复提供建议。

1 研究区概况及研究方法

宁波市地处长江三角洲南翼, 浙江省东部沿海, 地理位置东经 $120^{\circ}55' \sim 122^{\circ}16'$ 、北纬 $28^{\circ}51' \sim 30^{\circ}33'$, 属于亚热带季风气候, 年均降水量 1480 mm, 年均气温 16.4℃。植被以人工针叶林、毛竹林、经济林为主, 少量次生阔叶林, 地带性的亚热带常绿阔叶林植被残存于边远山区(蓝雪春, 2017), 其中针叶林是主要植被类型, 广布于中低山、丘陵山地; 阔叶林是典型的地带性植被类型, 主要分布在宁海、北仑、鄞州等地; 灌丛以壳斗科、胡桃科、杜鹃花科、金缕梅科为主。

研究区位于太平洋陆缘火山岩带的西南部浙闽粤中生代火山岩带北段, 丽水-余姚深断裂以东(舒良树, 2012)。自晚中生代白垩纪以来, 区内火山活动十分强烈, 先后经历了燕山期和喜马拉雅期 2 次构造岩浆活动, 直至更新世仍见其活动的踪迹。岩石建造以中生代中酸性火山岩为主, 其次为新生代基性火山岩(余明刚等, 2021), 常见岩石类型有花岗岩、玄武岩、流纹岩、砂岩等。土壤以红壤为主, 主要由花岗岩、流纹岩和玄武岩风化形成。依据《地表基质分类方案(试行)》的原则(自然资源部, 2020b), 并结合相关研究成果(贾磊等, 2022), 研究区地表基质划分为 4 大类 12 个小类, 其中花岗岩、流纹岩和玄武岩类残坡积地表基质分布最广(图 1)。

本文采取剖面研究和采样测试分析的方式, 分

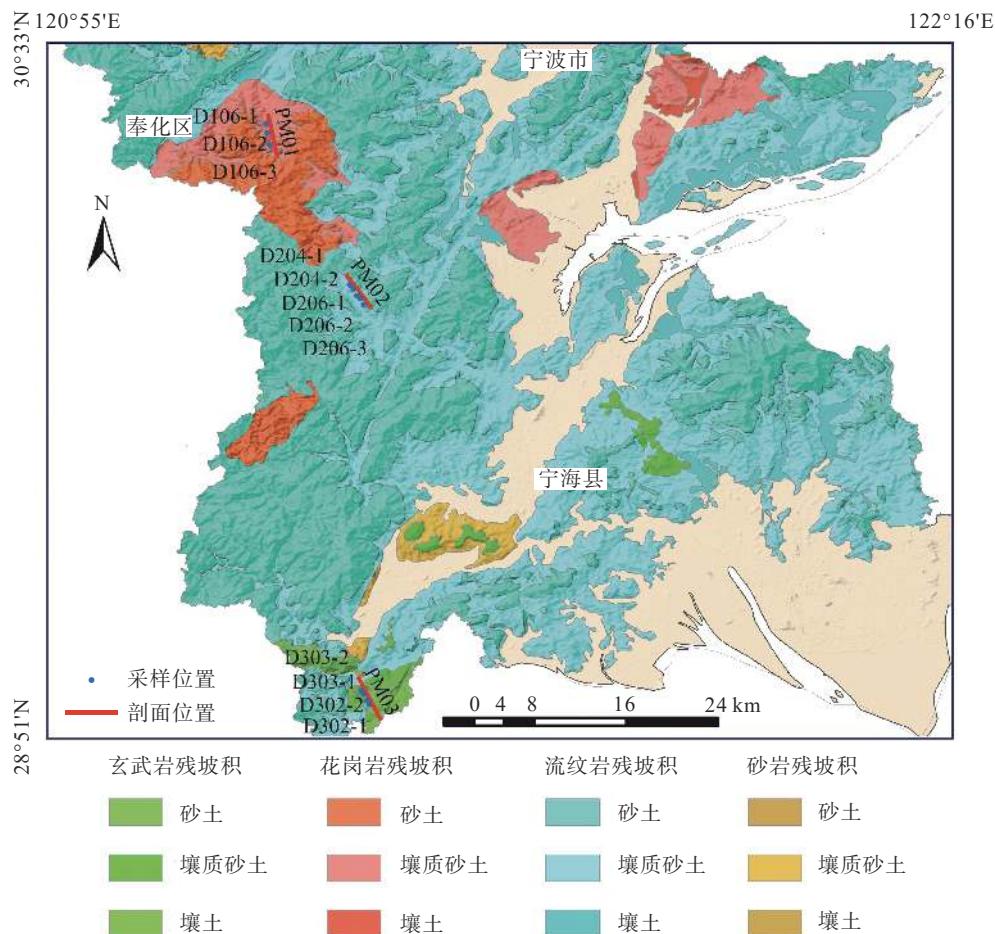


图1 宁波山丘区地表基质分布及剖面采样位置

Fig. 1 Distribution of ground substrate and sampling locations of profiles in Ningbo hilly area

析地表基质的空间结构特征和元素变化特征。空间结构主要调查地表基质的剖面结构、质地、岩石裂隙发育程度,质地在野外采用过筛法,微粒组分送相关实验室,采用激光粒度仪进行检测,依据《中国土壤系统分类土族和土系划分标准》进行土质分类(张甘霖,2013)。样品主要包括土质化学样品、质地样品和岩石样品,采样位置见图1,每个点位分别采集6~10个样品,共采集土质化学样品30件,质地样品14件,岩石样品3件,并对其N、P、K、Ca、Na等24种主量和微量元素的含量与变化特征进行测试分析(骆珊等,2021),具体测定方法见表1。

2 结果分析

2.1 空间结构异质性

地表基质的空间结构演化与岩石风化成土密切相关,同时母质岩石或者沉积物的性质在很大程度上决定着地表基质的理化性质(Li et al., 2016; 裴小

龙等,2020)。本文主要对研究区花岗岩、流纹岩和玄武岩3类岩石建造的地表基质剖面结构特征和质地特征进行了分析(图2)。

表1 各类指标测定方法

Table 1 Measurement methods for indicators

检测项目	分析方法	检测仪器
Al_2O_3 、 CaO 、 K_2O 、 MgO 、 MnO 、 Na_2O 、 SiO_2 、 TFe_2O_3 、 P_2O_5 、 TiO_2	X射线荧光光谱法	X射线荧光光谱仪
FeO	基准重铬酸钾溶液滴定	—
As、Cd、Co、Cu、Mo、Pb、V、Zn	电感耦合等离子体质谱法	等离子质谱仪
Cl	粉末压片-X射线荧光光谱法	X射线荧光光谱仪
F	离子选择电极法	离子选择性电极
Hg	蒸汽发生-冷原子荧光光谱法	原子荧光光谱仪
N	凯氏法	—

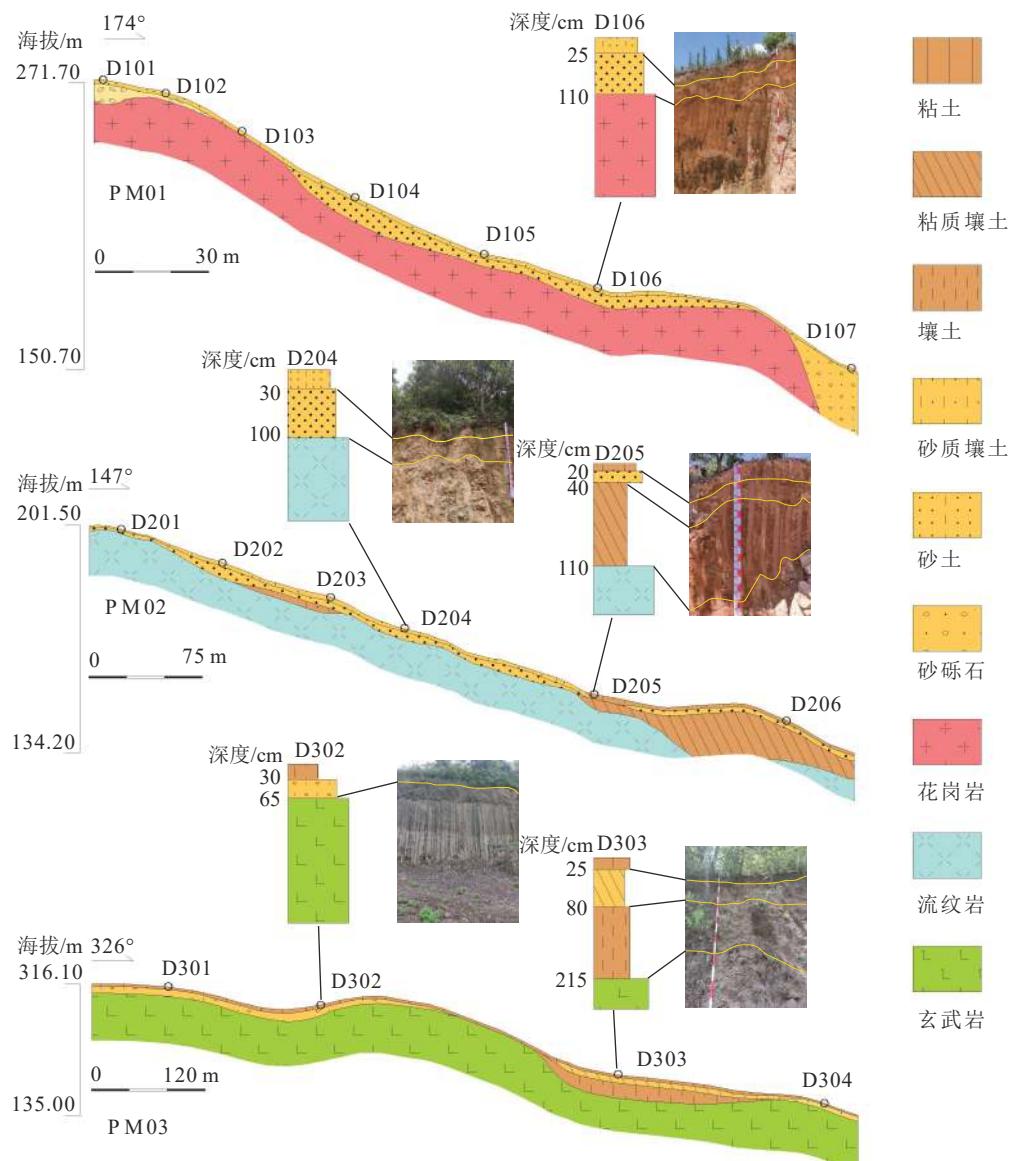


图2 三类典型地表基质剖面图

Fig. 2 Three types of typical surface substrates profiles

从剖面结构看, 花岗岩类地表基质主要为残坡积砂土(PM01), 垂向结构为雏形土-母质层, 厚度30~50 cm, 向下在坡度较缓的区域增厚, 整体风化层较深, 其浅部非构造节理为锯齿状非贯通型节理, 节理密度中等, 平均5~10个/m², 张开度多小于5 mm, 以紧闭型为主, 风化的残积物及土壤等充填物较少。流纹岩类地表基质上坡区主要为残坡积砂土(PM02), 30~50 cm, 垂向结构为雏形土-母质层; 在缓坡区为残坡积壤质砂土、壤土, 土质层较厚, 垂向结构为淋溶层-淀积层-母质层, 土壤类型为红壤, 风

化层深度整体较浅, 并发育平直型、锯齿状的贯通性节理, 节理密度平均为2~3个/m², 张开度集中在1.0~5.0 mm和大于5 mm, 属于中等张开程度, 风化残积物多属于断续充填。玄武岩类地表基质(PM03)土壤发育程度较高, 陡坡区垂向结构为残坡积壤质砂土, 厚度30~100 cm, 风化深度较厚; 在缓坡为残坡积壤土, 土质层较厚, 垂向结构为淋溶层-淀积层-母质层, 土壤类型为红壤, 风化层深度整体较浅。玄武岩浅部发育层状节理, 节理密度平均为10~15个/m², 深部发育柱状节理, 多为贯通性节理, 密度平均为

3~5个/m²。

从质地分析结果(小于2 mm粒度)看,花岗岩粒度分布较宽,在2~20 μm有一个主峰值,在0.2~1 μm和50~200 μm分别有较小的峰值,在野外的筛分法中,花岗岩地表基质表层粒度明显较粗,成分主体由难风化的石英颗粒构成。流纹岩粒度分布较稳定,整体粒度峰值为2~20 μm,表层与下部层位差异不明显。玄武岩表层与母质层主峰在20 μm附近,淀积层整体在0.2~1 μm附近,粒度偏细(图3)。

综上,3类典型母质岩石形成的地表基质空间结构特征差异较明显,表现出较强的空间异质性。其中,花岗岩母质形成的地表基质土质粗,易形成砂土,裂隙、孔隙发育,深度大,透水性及含水性强;流纹岩母质形成的地表基质土质较粗,易形成壤质砂土、壤土,风化深度浅,裂隙、孔隙相对发育,浅表透气好,水分充足;玄武岩母质形成的地表基质土质细,易形成壤土、粘质壤土,节理发育,孔隙不发育,通气性差。

2.2 元素特征异质性

山丘区地表基质的空间异质性主要受基岩结构与矿物成分影响(Clair et al., 2015; Xavier et al., 2015),同时岩石风化成土与元素的迁移过程直接影响地表基质的养分状况(Katemaher et al., 2019)。因此,探讨地表基质的元素异质性,需要从母质岩石的背景元素、岩石风化强度及元素迁移的特点进行分析,总结元素异质性特征及产生的原因。

2.2.1 地质背景元素

通过对不同地质背景的元素变化,分析地表基质元素异质性特征。从主量元素特征看,花岗岩、流纹岩富Si、K,贫Fe、Mg,而基性岩恰相反,富Fe、Mg,贫Si、K,土质元素A、B层也表现为同样的富集特点,即岩石元素含量偏高时,土质中的含量相对偏高,Na、Ca受淋滤作用影响,A层含量普遍偏低(图4-a)。从微量元素特征看,玄武岩中微量元素含量普遍偏高,仅Mo含量相对较低;花岗岩、流纹岩类Se、Mo相对较高,其他元素含量相对较低,A、B、C层中微量元素具有相似的富集关系,非金属元素多数表现为表层含量偏高,这与生物作用密切相关(图4-b)。综合主量和微量元素特征看,地表基质自下而上具有明显的继承性。

本文依据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016),对剖面不同表层土壤的8种养分元素

(Co、Ca、Cu、Zn、Mg、Mn、Mo、Fe)进行对比分析(图5)。从不同地质背景土壤养分元素看,花岗岩土壤中多数元素较缺乏或缺乏,仅Mo丰富;流纹岩土壤中Mo、Zn丰富,Fe、Mn中等—较缺乏,其他元素均缺乏;玄武岩土壤Fe、Mg、Co、Cu、Zn等元素均为丰富,Ca较缺乏,Mo缺乏。总体来说,玄武岩风化形成的土壤养分元素较丰富,而花岗岩、流纹岩形成的土壤养分元素整体较缺乏。

2.2.2 风化强度

研究表明,岩石的地球化学特征直接影响地表基质各层位的元素含量,目前用来描述衡量岩石或风化壳化学风化强度的指标,最常用的是化学蚀变指数CIA(包志伟等,1992; Prisia et al., 1999; 刘成禹等,2011)。

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100 \quad (1)$$

式中,氧化物按摩尔百分比计算,CaO^{*}指存在于硅酸盐中的CaO。

3种典型岩石类型的化学风化强度具有一定差异(表2),玄武岩化学风化强度值明显高于花岗岩、流纹岩,意味着玄武岩更容易释放岩石中的营养元素,易于形成地表基质的养分。

2.2.3 元素迁移系数

本文以母岩元素含量为基础,分析元素的迁移特征,进而分析不同元素的迁移富集规律。迁移系数K由公式(2)计算获得(宁晓波等,2009; 刘孜等,2020)。

$$K = C_n / C_D \quad (2)$$

式中,K为迁移系数,C_n为土壤各发生层元素含量,C_D为母岩元素含量。其中,当K>1时表示富集,K<1时表示贫瘠。K_A、K_C、K_R分别代表表层、母质层、基岩层的K值。

通过统计不同点位的元素迁移特征发现,地表基质中向上富集的元素主要有N、Cl、K及较多的微量元素,Na、Ca、Mg等元素流失量最大(图6)。As、Cd、Pb等重金属元素明显富集,N的K值最高,在10~30之间;Na和P元素表层微弱富集,母质层明显贫瘠。在玄武岩缓坡区个别点位,由于存在汇水区,表现为Na、Ca富集。

2.3 地表基质空间异质性对植被生态的影响

地表基质的空间结构和元素分异是岩石风化、水文和生物化学长期共同作用的结果(Sharma et al., 2000; Li et al., 2016; Russell et al., 2022)。岩石风化

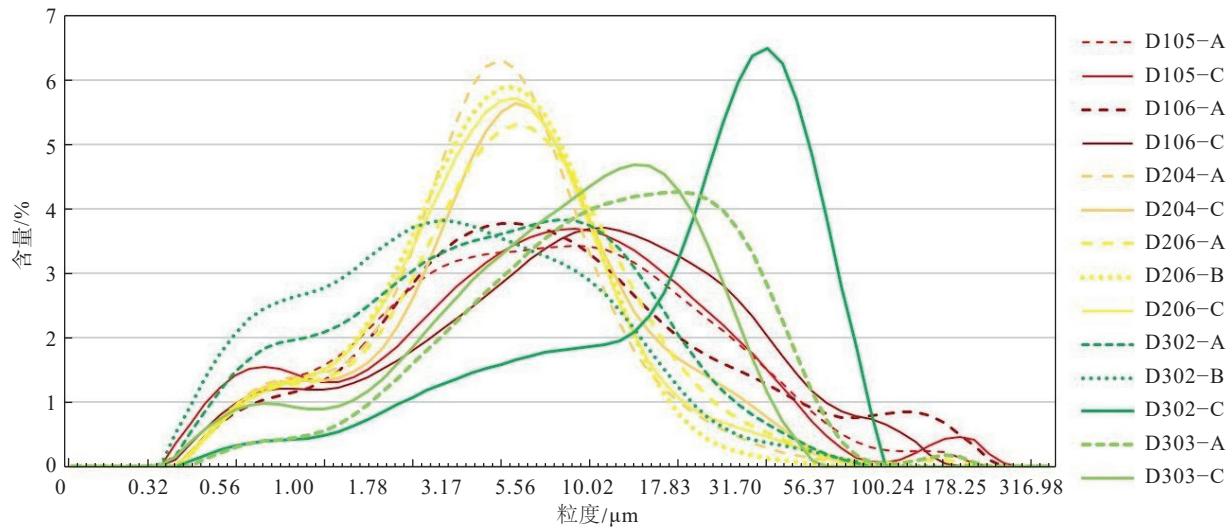


图3 不同点位地表基质质地粒度分布曲线

(A、B、C 分别对应点位的淋溶层、淀积层、母质层)

Fig. 3 Grain size distribution curves of surface substrates at different point locations

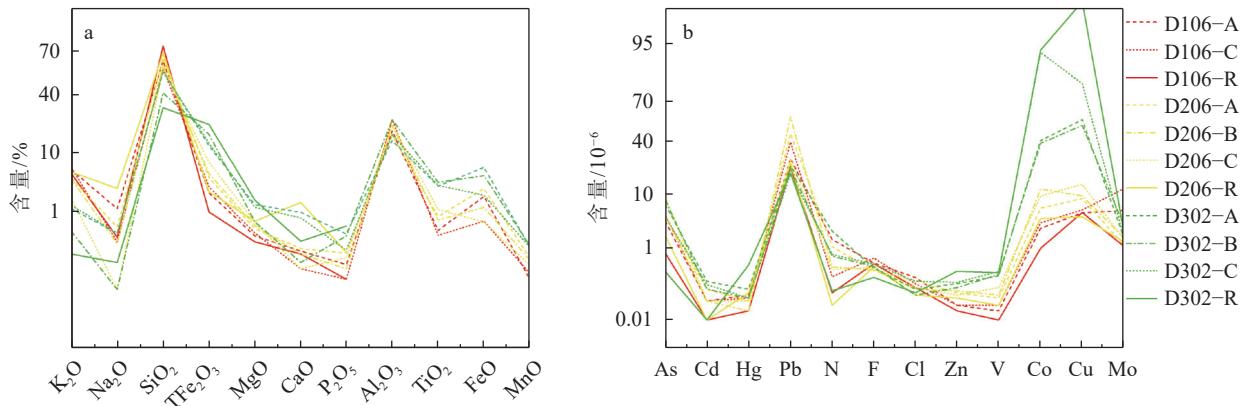


图4 主要元素(a)和微量元素(b)含量变化特征

(A、B、C、R 分别对应点位的淋溶层、淀积层、母质层、基岩层)

Fig. 4 The variation characteristics of main elements (a) and the trace elements (b)

时, 裂隙不断崩解形成微粒, 地表基质的空间结构在横向表现粗骨土—壤土的变化, 垂向上表现为粒度向上不断变细的特征。元素在不同地质作用下会发生不同的迁移富集行为, 造成元素分异的特征。风化作用下, 易风化矿物元素优先释放, 如 Fe、Mg、Na、Ca 等; 水文作用下, Na、K、Ca、Mg 等活泼金属的离子态受流水作用而流失; 生物化学作用下, N、Cl、F、K 等元素逐渐向表层富集。总体看, 生物所需元素和重金属元素会向表层富集(图 7), 活泼金属元素向下游迁移。

岩石母质的元素背景和岩石风化程度一定程度上控制着地表基质的养分状况, 进而影响植被的群落构建和空间分布。地表基质的空间结构直接影响

表层土的地气和水分交换、微生物群落类型和有机质组成, 进而影响植被根系的生长和分布(黄金廷等, 2008; 赵建飞等, 2022)。基岩的抗风化矿物的浓度调节其蓄水能力, 进而直接影响植被的空间分布(Russell et al., 2022)。基岩中抗风化矿物浓度越高, 颗粒越大, 越影响地表基质中水分的分布; 当基岩中抗风化矿物含量少时, 易风化矿物将释放更多的养分, 地表基质层中的养分元素含量也随之升高(汪振立等, 2002; 顾尚义等, 2003; Roering et al., 2010)。从水分与养分的供给看, 花岗岩风化形成的土壤, 土质以砂土居多, 水分蒸发快, 水肥易流失, 浅表缺水, 深部含水, 植被必须耐旱或者根系可以达到潜水/裂隙水才能生长, 适宜松、杉、灌木等植被。流纹岩以粉

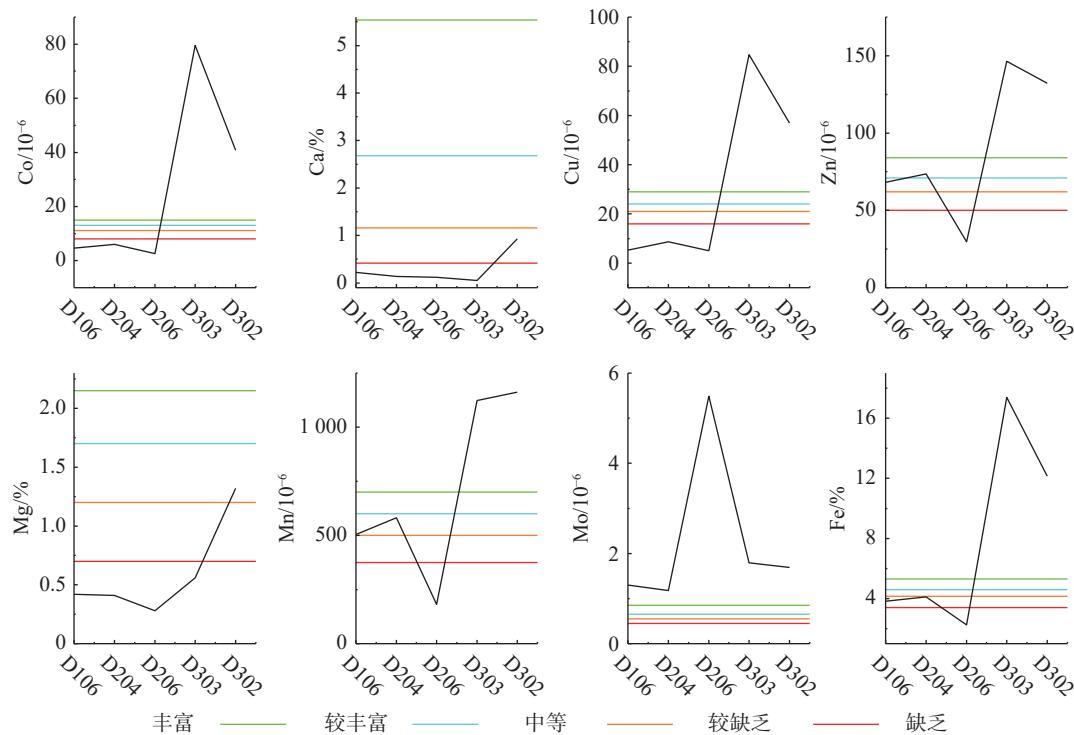


图 5 不同点位单元素养分含量评价图

Fig. 5 Evaluation map of component content of unit literacy at different points

表 2 地表基质风化强度 CIA 指数

Table 2 CIA index of weathering strength of surface substrates

点位	层位	CIA	点位	层位	CIA
D106	淋溶层	73.09	D206	淋溶层	77.98
	母质层	79.68		淀积层	83.36
D204	淋溶层	74.95	D302	母质层	92.29
	母质层	77.03		淋溶层	85.86
D303	淋溶层	97.62	D302	淀积层	87.74
	母质层	95.96		母质层	98.26

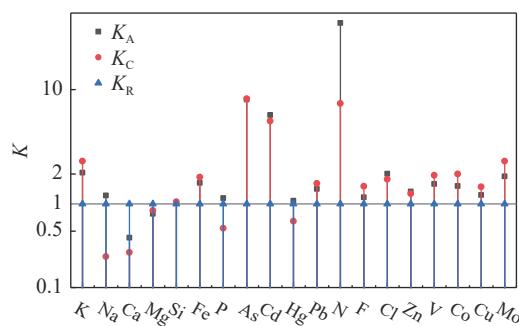


图 6 地表基质垂向元素迁移系数图

Fig. 6 Vertical element migration coefficient of ground substrate

K_A—表层 K 值; K_C—母质层 K 值; K_R—基岩层 K 值

土居多,下坡区表层砂壤土具有良好的通气性,下层壤土、粘壤土具有一定保水性,且风化层较浅,但部分养分元素相对缺乏,适宜槭、栎、竹、茶等多类植被。玄武岩整体保水性较好,矿质营养元素丰富,但土壤中粘粒含量高,不利于植被向下层扎根,且部分土壤通气性差,对植被根系具有要求,适宜杉、竹、茶等多类植被(表 3)。

3 讨 论

在自然环境中,因受地形、降水、水文等因素的影响,地表基质结构特征和元素特征的空间分布往往不是均质的,表现出空间分布上的复杂性和不均匀性,具有明显的空间异质性特征。地表基质与其他资源要素的空间异质性具有一定的相似性,由时间和空间维度上的综合作用形成,具有空间梯度性和空间缀块性特征(Li et al., 1995; 张志永, 2017)。空间异质性可以理解成尺度的函数,具有尺度的表现性,随着尺度的改变,其空间异质性也会发生改变(Titus et al., 2002; 王志述等, 2015),意味着离开尺度去讨论其空间异质性将毫无意义。同时,地表基质空间异质性为促进各资源要素寻求和占据其适宜生态条件,形成多元空间格局提供了基础条件,这对优

化景观空间配置、保护生物多样性和维持生态系统稳定具有重要意义(徐武美等,2015;刘绿怡,2018)。

地表基质空间异质性影响着植被生态,如植被群落的构建、组成、分布等。同时,植被生态对地表基质空间异质性具有一定的反馈作用,如植被的物种组成、营养积累和贮留能力会影响地表基质元素的空间分布格局,此外,植被的退化将加剧土壤的风蚀和营养元素的迁移,进而影响地表基质元素空间异质性(胡忠良等,2009;刘晨,2015)。因此,地表基质空间异质性对植被的影响是一种复杂的相互作用过程,本文仅从地质学角度定性探讨了地表基质对

植被的影响机理,具有一定的局限性,今后还需加大研究力度,定量分析其影响规律和反馈机制,对于进一步掌握现有植被生态状态并预测其动态变化具有重要意义。

4 结 论

本文以典型剖面阐述了3类地表基质的空间异质性,结合岩石的结构特征和元素组成,分析了地表基质空间异质性产生的原因,进而探讨了不同植被与地表基质的适宜性。

(1)宏观尺度下,地表基质的异质性受岩石风化、生物地球化学、水文等作用共同影响。岩石风化作用和水文作用影响基质的结构、厚度和粒度变化。受化学风化、水文作用及生物化学作用的影响,不同元素表现出不同的地球化学行为,相似的迁移行为促使性质相近的元素具有类似的分布规律。

(2)景观尺度下,岩石地质建造控制着景观尺度下的地表基质空间异质性。基岩中抗风化矿物浓度越高,颗粒越大,其形成的土质越粗;当基岩中某些元素含量越高,其形成的土质元素含量越高。

(3)地表基质主要影响水分和养分的分布,进而影响着植被类型。因地表基质的空间结构制约着水分空间分布,而元素的异质性表现为不同的养分状况,水分和养分的空间分布和丰度差异,制约着山丘区的植被生长。

致谢:感谢长三角宁波地区自然资源地表基质层调查项目组提供的基础资料。感谢审稿专家的宝贵意见和建议,极大地提升了本文的质量,感谢团队成员的辛勤工作和努力付出。

References

- Banwart S A, Chorver J, Gaillardet G, et al. 2013. Sustaining earth's critical zone basic science and interdisciplinary solutions for global challenges [R]. United Kingdom: The University of Sheffield.
- Bao Z W. 1992. A geochemical study of the granitoid weathering crust in Southeast China [J]. Geochimica, 21(2): 166–174 (in Chinese with English abstract).
- Clair J S, Moon S, Holbrook W S, et al. 2015. Geophysical imaging reveals topographic stress control of bedrock weathering [J]. Science, 350(6260): 534–538.
- Ding Y J, Zhang S Q, Han T D, et al. 2014. Opportunities and challenges of studies across land surface processes to land surface system sciences [J]. Advances in Earth Science, 29(4): 443–455 (in Chinese with English abstract).

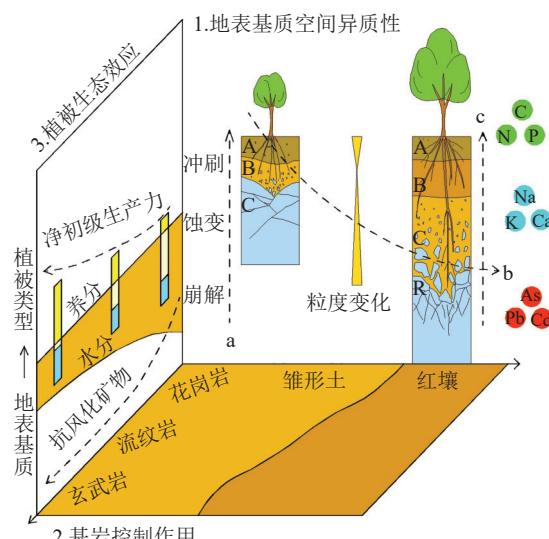


图7 地表基质异质性演化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of ground substrate heterogeneity evolution

A—淋溶层; B—淀积层; C—母质层; R—基岩; a—风化作用;
b—水文作用; c—生物化学作用

表3 三种典型地表基质的植被适宜条件

Table 3 Vegetation suitability conditions for three typical ground substrate

地表基质类型	养分特征	水分制约	优势根系	适宜植被
花岗岩类	缺乏,富K、Mo	深层水分较丰富	垂直根系	松、杉、灌木等
流纹岩类	缺乏—中等,富K、Zn、P	上坡相对缺水,下坡水分供给丰富	垂直根系、辐射根系	槭、栎、竹、茶等多类植被
玄武岩类	多数元素丰富	水分充沛,中层隔水	辐射根系、串珠根系	杉、竹、茶等多类植被

- Ge L S, Yang G C. 2020. New field of natural resources survey and monitoring: Ground substrate survey[J]. *Natural Resource Economics of China*, 33(9): 4–11 (in Chinese with English abstract).
- Gu S Y, Wan G J, Miao J Q. 2003. Chemical weathering for dacite in Pingxiang, Guangxi[J]. *Geochimica*, 32(4): 328–334 (in Chinese with English abstract).
- Hu Z L, Pan G X, Li L Q, et al. 2009. Changes in pools and heterogeneity of soil organic carbon, nitrogen and phosphorus under different vegetation types in Karst mountainous area of central Guizhou Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 29(8): 4187–4195 (in Chinese with English abstract).
- Huang J T, Hou G C, Tao Z P, et al. 2008. Vegetation ecological areas of the Ordos Plateau and their hydrogeological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(8): 1330–1334 (in Chinese with English abstract).
- Jia L, Liu H, O Y Y, et al. 2022. Division scheme of surface substrate mapping units of mountainous-hilly area in South China based on geological formations research: example from Xinhui-Taishan area in Pearl River Delta[J]. *Northwestern Geology*, 55(4): 140–157 (in Chinese with English abstract).
- Katemaher, Alexis N. 2019. Reactive transport processes that drive chemical weathering: from making space for water to dismantling continents[J]. *Mineralogy and Geochemistry*, 85(1): 349–380.
- Lan X C, Cheng L. 2017. Study on the regionalization of soil and water conservation in Ningbo City[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 15(1): 141–147 (in Chinese with English abstract).
- Li G, Henry L. 2016. Critical Zone research and observatories: Current status and future perspectives[J]. *Vadose Zone Journal*, 15(9): 1–14.
- Li H, Reynolds J F, et al. 1995. On definition and quantification of heterogeneity[J]. *Oikos*, 73(2): 280–284.
- Li X R. 2005. The impact of spatial heterogeneity changes in arid sandy soil on vegetation restoration[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, (4): 361–370 (in Chinese with English abstract).
- Li X, Zhou X H, Xiang Z Q. 2023. Simply discussion on the work of ground substrate survey: Taking Hainan Island as an example[J]. *Geological Bulletin of China*, 42(1): 68–75 (in Chinese with English abstract).
- Lin H. 2010. Earth's Critical Zone and hydrometeorology: Concepts, characteristics, and advances[J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14: 25–45.
- Liu C Y, He M C. 2011. Research on the sensitive chemical weathering indices to rock weathering[J]. *Earth and Environment*, 39(3): 349–354 (in Chinese with English abstract).
- Liu C. 2015. The mechanisms by grazing on grassland plant and soil spatial heterogeneity and their correlation[D]. Doctoral Dissertation of Northeast Normal University (in Chinese with English abstract).
- Liu L Y, Bian Z Q, Ding S Y. 2018. Effects of landscape spatial heterogeneity on the generation and provision of ecosystem services[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(18): 6412–6421 (in Chinese with English abstract).
- Liu S, Li P, Feng Z. 2019. Eco-restoration research progress and strategy about wind-break and sand-fixation forest in Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 38(1): 267–274 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z, Huang X K, Xu H L, et al. 2020. Migration characteristics of elements in the rock-soil system and suitability evaluation of orange planting in Yaqueling area, Yichang, Hubei Province[J]. *Geology in China*, 47(6): 1853–1868.
- Luo S, Zhang D M, Lu D B, et al. 2021. Evaluation of trace elements abundance and deficiency in cultivated soil and its influencing factors in Bijie City of Wumeng Mountain[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(9): 1570–1583 (in Chinese with English abstract).
- Ma T, Shen S, Deng Y M, et al. 2020. Theoretical approaches of survey on Earth's Critical Zone in basin: An example from Jianghan Plain, Central Yangtze River[J]. *Earth Science*, 45(12): 4498–4511 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Natural Resources. 2020. Notice of the general office of the ministry of natural resources printing and distributing “The ground substrate classification scheme (trial)”[EB/OL]. (2020-12-22) [2024-01-09]. <http://gi.mnr.gov.cn/202012/202012222596025.html> (in Chinese).
- Ministry of Natural Resources. 2020. Notice of the ministry of natural resources on issuing the overall plan for the construction of the Natural Resources Investigation and Monitoring System[EB/OL]. (2020-01-17) [2024-01-09]. http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200117_2498071.html (in Chinese).
- Ning X B, Xiang W H, Fang X, et al. 2009. Chemical element concentration in calcite, calcareous soil and plants on the rocky desertification area in Huaxi, Guiyang[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(5): 34–41 (in Chinese with English abstract).
- Pei X L, Han X L, Qian J L, et al. 2020. Soil fertility assessment indicators from the perspective of natural resources comprehensive observation[J]. *Resources Science*, 42(10): 1953–1964 (in Chinese with English abstract).
- Priscia O, Jérôme V, Bernard D, et al. 1999. The effect of organic matter on chemical weathering: study of a small tropical watershed: nsimi-zoétélé site, cameroon[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(23): 4013–4035.
- Richter D J, Mobley M. 2009. Monitoring earth's critical zone[J]. *Science*, 326(20): 1067–1068.
- Roering J J, Marshall J, Booth A M, et al. 2010. Evidence for biotic controls on topography and soil production[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 298: 183–190.
- Russell C P, Clifford R S, Leonard S S, et al. 2022. Forest vulnerability to drought controlled by bedrock composition[J]. *Nature Geoscience*, 9(15): 714–719.
- Shao F L. 2012. Study on spatial heterogeneity relationship of vegetation structure and soil components in typical forest of northern Hebei mountains[D]. Doctoral Dissertation of Beijing Forestry University (in Chinese with English abstract).
- Sharma A, Rajamani V. 2000. Weathering of gneissic rocks in the upper reaches of Cauvery river, south India: Implications to neotectonics of the region[J]. *Chemical Geology*, 166(3/4): 203–223.
- Shu L S. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in

- South China Block[J]. Geological Bulletin of China, 31(7): 1035–1053 (in Chinese with English abstract).
- Titus J H, Nowak R S, Smith S D. 2002. Soil resource heterogeneity in the Mojave Desert[J]. *Journal of Arid Environments*, 52(3): 269–292.
- Wang Z L, Wei Z G, Tao Y, et al. 2002. Distribution, migration and accumulation of rare earth elements (REE) in the rock-soil-Dicranopteris dichotoma (RSD) system[J]. Geological Bulletin of China, 21(12): 881–889 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z S, Zhang K B, Wang X. 2015. Spatial heterogeneity of vegetation in artificially fenced area in Liuyangpu of Yanchi County in Ningxia[J]. Science of Soil and Water Conservation, 13(5): 52–57 (in Chinese with English abstract).
- Xavier Z R, Jennifer M, Laura R, et al. 2015. Climatic and landscape controls on water transit times and silicate mineral weathering in the critical zone[J]. *Water Resources Research*, 51(8): 6036–6051.
- Xu W M, Song C Y, Li Q M. 2015. Relationship between soil resource heterogeneity and tree diversity in Xishuangbanna Tropical Seasonal Rainforest, Southwest China[J]. *Acta Ecol. Sin.*, 35(23): 7756–7762 (in Chinese with English abstract).
- Yang S H, Song X D, Wu H Y, et al. 2024. A review and discussion on the Earth's Critical Zone research: Status quo and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 61(2): 308–318 (in Chinese with English abstract).
- Yao X F, Yang J F, Zuo L Y, et al. 2022. Discussion on connotation and survey strategy of the ground substrate[J]. Geological Bulletin of China, 41(12): 2097–2105 (in Chinese with English abstract).
- Yin Z Q, Hao A B, Wu A M, et al. 2022. The key progress in Chengde and the national proposal of the integrated survey of natural resources[J]. Geological Bulletin of China, 41(12): 2087–2096 (in Chinese with English abstract).
- Yin Z Q, Qin X G, Zhang S J, et al. 2020. Preliminary study on classification and investigation of surface substrate[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 47(6): 8–14 (in Chinese with English abstract).
- Yu M G, Hong W T, Yang Z L, et al. 2021. Classification of Yanshanian volcanic cycle and the related mineralization in the coast area of southeastern China[J]. Geological Bulletin of China, 40(6): 845–863 (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*, 51(10): 1681–1692 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G L, Wang Q B, Zhang F R, et al. 2013. Criteria for establishment of soil family and soil series in Chinese soil taxonomy[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 50(4): 826–834 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z Y. 2017. Spatial distribution of vegetation and soil in temperate savanna ecosystem, Inner Mongolia[D]. Doctoral Dissertation of Chinese Academy of Forestry (in Chinese with English abstract).
- Zhao J F, Liang Z M, Liu J T, et al. 2022. Variable runoff generation layer distributed hydrological model for hilly regions[J]. *Advances in Water Science*, 33(3): 429–441 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Q, Li T T, Zhang Q D. 2020. Soil nutrients' spatial heterogeneity and effects on vegetation distribution in Taiyue mountain[J]. *Journal of Shanxi Normal University Natural Science Edition*, 34(1): 79–84 (in Chinese with English abstract).
- Zhao X J, Wu T S, Zhong X Y, et al. 2020. Comprehensive evaluation of ecological risk of farmland soil in typical karst area of Guangxi area with high heavy metal background[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 48(22): 252–261 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 包志伟. 1992. 华南花岗岩风化壳稀土元素地球化学研究[J]. *地球化学*, 21(2): 166–174.
- 丁永建, 张世强, 韩添丁, 等. 2014. 由地表过程向地表系统科学的研究跨越的机遇与挑战[J]. *地球科学进展*, 29(4): 443–455.
- 葛良胜, 杨贵才. 2020. 自然资源调查监测工作新领域: 地表基质调查[J]. *中国国土资源经济*, 33(9): 4–11.
- 顾尚义, 万国江, 毛健全. 2003. 广西凭祥英安岩的化学风化作用研究[J]. *地球化学*, 32(4): 328–334.
- 胡忠良, 潘根兴, 李恋卿, 等. 2009. 贵州喀斯特山区不同植被下土壤C、N、P含量和空间异质性[J]. *生态学报*, 29(8): 4187–4195.
- 黄金廷, 侯光才, 陶正平, 等. 2008. 鄂尔多斯高原植被生态分区及其水文地质意义[J]. *地质通报*, 27(8): 1330–1334.
- 贾磊, 刘洪, 欧阳渊, 等. 2022. 基于地质建造的南方山地—丘陵区地表基质填图单元划分方案——以珠三角新会—台山地区为例[J]. *西北地质*, 55(4): 140–157.
- 蓝雪春, 程岚. 2017. 宁波市水土保持区划研究[J]. *中国水土保持科学*, 15(1): 141–147.
- 李响, 周效华, 相振群, 等. 2023. 地表基质调查的工作思路刍议: 以海南岛为例[J]. *地质通报*, 42(1): 68–75.
- 李新荣. 2005. 干旱沙区土壤空间异质性变化对植被恢复的影响[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, (4): 361–370.
- 刘晨. 2015. 放牧对草地植被、土壤空间异质性及其相互关系的调控机制[D]. 东北师范大学博士学位论文.
- 刘成禹, 何满潮. 2011. 对岩石风化程度敏感的化学风化指数研究[J]. *地球与环境*, 39(3): 349–354.
- 刘绿怡, 卞子元, 丁圣彦. 2018. 景观空间异质性对生态系统服务形成与供给的影响[J]. *生态学报*, 38(18): 6412–6421.
- 刘硕, 李品, 冯兆忠. 2019. 京津冀防风固沙植被生态修复研究进展与对策[J]. *生态学杂志*, 38(1): 267–274.
- 刘孜, 黄行凯, 徐宏林, 等. 2020. 湖北宜昌鹃鵙岭地区岩石—土壤元素迁移特征及柑橘种植适宜性评价[J]. *中国地质*, 47(6): 1853–1868.
- 骆珊, 张德明, 卢定彪, 等. 2021. 乌蒙山区毕节市耕地土壤微量元素丰缺评价及其影响因素[J]. *地质通报*, 40(9): 1570–1583.
- 马腾, 沈帅, 邓娅敏, 等. 2020. 流域地球关键带调查理论方法: 以长江中游江汉平原为例[J]. *地球科学*, 45(12): 4498–4511.
- 宁晓波, 项文化, 方晰, 等. 2009. 贵阳花溪石灰岩、石灰土与定居植物化学元素含量特征[J]. *林业科学*, 45(5): 34–41.
- 裴小龙, 韩小龙, 钱建利, 等. 2020. 自然资源综合观测视角下的土壤肥力评价指标[J]. *资源科学*, 42(10): 1953–1964.
- 邵方丽. 2012. 冀北山地典型森林植被与土壤成分的空间异质性关系研究[D]. 北京林业大学博士学位论文.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. *地质通报*, 31(7):

- 1035–1053.
- 汪振立, 魏正贵, 陶治, 等. 2002. 岩石-土壤-铁芒萁系统中稀土元素的分布、迁移和累积[J]. 地质通报, 21(12): 881–889.
- 王志述, 张克斌, 王晓. 2015. 盐池柳杨堡人工封育区植被空间异质性[J]. 中国水土保持科学, 13(5): 52–57.
- 徐武美, 宋彩云, 李巧明. 2015. 西双版纳热带季节雨林土壤养分空间异质性对乔木树种多样性的影响[J]. 生态学报, 35(23): 7756–7762.
- 杨顺华, 宋效东, 吴华勇, 等. 2024. 地球关键带研究评述: 现状与展望[J]. 土壤学报, 61(2): 308–318.
- 姚晓峰, 杨建锋, 左力艳, 等. 2022. 地表基质的内涵辨析与调查思路[J]. 地质通报, 41(12): 2097–2105.
- 殷志强, 郝爱兵, 吴爱民, 等. 2022. 承德自然资源综合调查主要进展与全国自然资源综合调查总体思路[J]. 地质通报, 41(12): 2087–2096.
- 殷志强, 秦小光, 张蜀冀, 等. 2020. 地表基质分类及调查初步研究[J]. 水文地质工程地质, 47(6): 8–14.
- 余明刚, 洪文涛, 杨祝良, 等. 2021. 东南沿海燕山期火山活动旋回划分及其成矿规律[J]. 地质通报, 40(6): 845–863.
- 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.
- 张甘霖, 王秋兵, 张凤荣, 等. 2013. 中国土壤系统分类土族和土系划分标准[J]. 土壤学报, 50(4): 826–834.
- 张志永. 2017. 内蒙古温带疏林草地生态系统植被-土壤的空间分异特征研究[D]. 中国林业科学研究院博士学位论文.
- 赵建飞, 梁忠民, 刘金涛, 等. 2022. 山丘区变动产流层分布式水文模型[J]. 水科学进展, 33(3): 429–441.
- 赵倩, 李婷婷, 张钦弟. 2020. 太岳山植物群落土壤养分空间异质性及其对植被分布的影响[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 34(1): 79–84.
- 赵辛金, 吴天生, 钟晓宇, 等. 2020. 广西典型岩溶区重金属高背景区农田土壤生态风险综合评价[J]. 江苏农业科学, 48(22): 252–261.
- 自然资源部. 2020a. 自然资源部关于印发《自然资源调查监测体系构建总体方案》的通知[EB/OL]. (2020-01-17) [2024-01-09]. http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200117_2498071.html.
- 自然资源部. 2020b. 自然资源部办公厅印发《地表基质分类方案(试行)》的通知[EB/OL]. (2020-12-22) [2024-01-09]. <http://gi.mnr.gov.cn/202012/t202012222596025.html>.