地球关键带分类方法与中国案例研究

张甘霖^{1,2,3*}, 宋效东¹, 吴克宁^{4,5}

1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008;
2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008;
3. 中国科学院大学现代农业科学学院, 北京 100049;
4. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083;
5. 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035

* 通讯作者, E-mail: glzhang@issas.ac.cn

收稿日期: 2020-09-18; 收修改稿日期: 2021-05-06; 接受日期: 2021-06-02; 网络版发表日期: 2021-07-19

国家重点研发计划项目(编号: 2018YFE0107000)、国家自然科学基金项目(批准号: 41571130051、41771251、41977003)和第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号: 2019QZKK0306)资助

摘要 地球关键带是地球表层系统自然综合体, 存在着区域均一性与差异性. 国内外学者已围绕不同类型的地球关键带开展了一系列研究, 但迄今为止没有构建一个系统的分类体系或进行区域划分, 因此不能综合反映其区域特征. 为了适应科学研究与自然资源规划的需要, 在梳理地球关键带构成及其形成与演化主导影响因素的基础上, 采用气候、成土母质、土壤类型、地下水深度、地貌类型与土地利用要素构建了地球关键带三级分类方案. 在遵循地带性与非地带性相结合、地理要素量变与质变相结合的原则下, 使用叠置法对主要构成要素的高级分类进行叠加和综合, 并以中国为案例进行了地球关键带区划和制图. 基于制图综合, 将中国划分为44个一级单元、100个二级单元与1448个三级单元. 对比分析了三级分类中典型单元的空间分异特征与形成原因, 并分析了典型地球关键带的特征与中国现有观测站及其类型. 通过对比国内相关区划工作, 讨论了地球关键带分类与区划的应用价值与相关问题. 通过分析国内外近十年的地球关键带研究进展, 指出构建地球关键带演化过程与生态系统服务功能统一的理论框架是该新兴领域的重要任务之一. 该研究提出的地表综合体分类方案能够综合体现地球关键带的区域差异及其驱动因子格局, 为地表自然资源综合管理提供科学依据, 可望对国内外相关研究提供参考和借鉴.

关键词 地球关键带, 分类, 升尺度, 演变, 空间分布

1 引言

地球表层系统由岩石圈、土壤圈、水圈、生物圈、大气圈等圈层构成. 系统内各圈层在垂直和水平方向存在连续性和变异性, 构成了一个在三维空间上

的立体结构. 因此, 与任何自然实体一样, 地球表层系统在不同空间尺度内可以分割成相对均一的单元.

地球表层系统这一概念, 或者说学术思想, 已有较长的发展历程. 早在20世纪50年代, 黄秉维先生担任中国自然区划工作委员会副主任, 协助竺可桢先生组织

中文引用格式: 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. 中国科学: 地球科学, 51(10): 1681–1692, doi: 10.1360/SSTe-2020-0249
英文引用格式: Zhang G, Song X, Wu K. 2021. A classification scheme for Earth's critical zones and its application in China. Science China Earth Sciences, 64(10): 1709–1720, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9798-2>

中国不同学科领域的科学家主编了《中国综合自然区划》。1983年, 赵松乔先生提出了“中国综合自然地理区划的一个新方案”, 将中国划分为三个自然区: 东部季风区、西北干旱区和青藏高寒区(赵松乔, 1983)。1986年, 钱学森先生提出“地球系统科学”这一概念, 认为地理系统是一个“开放的复杂巨系统”。20世纪80~90年代, 吴传钧先生积极组织地理学界参与农业区划研究, 并完成了《中国农业区划》等重大成果。赵松乔等(1988)进一步指出“土地系统是包括地质、地貌、气候、水文、植被、土壤等全部自然地理要素的综合体”, 陆大道和郭来喜(1998)指出地球表层与社会经济的发展密切相关。上述系列研究工作和探索虽然从概念上提出了“地球表层系统”, 但对地表系统本身并没有定义明确的边界, 因此较长时间以来仅停留在概念上而缺乏可操作的实体对象。

21世纪初, 美国国家研究委员会提出“地球关键带”(Earth's Critical Zone)的概念(National Research Council, 2001), 并指出地球关键带研究是21世纪地球科学研究的前沿。在这一理论框架中, 以地球关键带这一概念对地球表层系统进行了具有操作意义上的划分, 在垂直维上包含了从岩石-土壤风化界面到植被冠层顶部的近地表大气, 因此从内涵上包括了上述所有圈层。地球关键带这一概念可以说在国际上首次为地球表层系统科学研究提供了一个可以操作的实体框架。虽然地球关键带研究多以流域为基本单元, 但在水平维度上并没有给出明确的边界, 这也正是本研究试图解决的问题。

目前, 全球已建立了60多个比较系统的地球关键带观测站(Giardino和Houser, 2015), 相关研究重点关注区域观测, 着重理解地表过程各要素的响应与交互机理。地球关键带观测站群的构建与科学研究已取得阶段性进展(Lin, 2010; Banwart等, 2011; Shao等, 2018), 但仍有诸多问题有待于进一步拓展, 例如物质和能量在地球关键带内部的转化和转移机制、气候变化对地球关键带演化的影响等。目前地球关键带科学观测与模拟主要集中在田间尺度与流域尺度, 处于以“典型类型”为对象的站点研究阶段。

地球关键带分类首先要解决的问题就是确定分析的对象。地球关键带的各组成要素均是空间连续的独立系统。对于地表综合体的划分, 前人已经有些尝试, 其中最具代表性和系统性的是SOTER的概念与划分

(Van Engelen, 1993; Zhang和Zhao, 2008), SOTER是土壤(SOil)和地体(TErrain)综合体的简称, 综合了土壤和岩石的类型, 并据此开展了一些区域的实验性研究(Igué等, 2004; Batjes, 2008)。Lü等(2019)使用地质、生态、气候、社会经济等指标对中国黄土高原进行了地球关键带类型划分。黄土高原地质、地貌、气候与土壤类型相对而言较为均一, 但该研究已经具备了地球关键带分区和分类思想。虽然大量学者已从功能、种类、特征的角度研究了各基础要素的分类或区划, 但如何集成这些分类信息对地球关键带二次分区是研究的难点和重点问题。国际上对于这个问题的认识尚未形成统一的结论。

无论是地球表层系统, 还是地球关键带, 或者SOTER, 都是对地球表层系统认知的方法论, 在自然资源综合管理上具有工具价值。为了更加清晰地认识地球关键带系统的空间变异性, 以及由此决定的物质迁移、转化过程的特征及其对陆地生态系统功能的影响, 有必要对其进行类型的划分和空间区划, 这种划分对不同类型的地球关键带科学研究和自然资源综合管理具有重要的指导意义。

本文提出了三级地球关键带分类的原则与具体方法, 探讨了该分类体系的普适性, 以中国的地球关键带类型划分为例, 对比讨论了该分类体系的合理性与不足, 以期为国内外相关研究提供参考。

2 材料与方法

2.1 分类依据、原则与方法

分类是地理分区的理论基础, 地球关键带的分类重点体现相对一致性原则, 即注重不同等级区域内部特征的一致性与变异特征。相同区域是统一、相似发展过程的结果。因此, 不同分类等级的同一类型的区域必须体现发展过程的相似性。为了综合反映不同圈层的交叉作用机理、形成演化影响因素、组成与结构特点、生态系统服务等主题, 本文构建了三级分类体系: 第一级: 基于成土母质(母岩)与气候要素; 第二级: 在第一级的基础上增加土壤类型要素; 第三级: 在前二级的基础上增加地下水深度、地貌类型和土地利用要素(图1)。

地球表层各要素的空间分布充分体现了量变到质变的连续特征(郑度等, 2005), 在实际的区划实践中很

图 1 地球关键带分类示意图

难找到一条自然的边界线, 这种分界线多以地带的形式存在, 例如山地、温度等高线等。如何客观地体现地球关键带各组成要素的过渡特征, 也是最大程度反映各等级地球关键带类型分异程度的技术难点之一。因此, 类似于综合自然地理区划的叠置法(倪绍祥, 1994), 我们尽量使用较为成熟的区划成果或高级分类等级, 在对类型归纳和总结的基础上使用各地理要素的最高分类级别进行综合叠加。各级别地球关键带的生成采用地理单元叠加的方法, 叠加操作产生的面积较小的图斑按照其相邻图斑的大小与相邻边长度进行融合, 各级别单元的命名规则如表1所示。

第一级分类: 地球关键带在结构上表现为垂直分层、水平分异、立体交叉和多级嵌套的特征(图1)。在空间上, 各圈层不是截然分开的, 而是相互交叉、相互渗透, 构成了一个立体交叉的结构, 其主要控制因素包括成土母质(母岩)与气候。土壤和岩石作为地球表层系统的重要组分, 必然是系统分类判别的重要依据之一。成土母质既继承了岩石的特性, 也是土壤形成的物质基础, 是岩石圈和土壤圈的过渡环节, 故可作为岩石圈和土壤圈的代表, 成为地球表层系统分类的重要依据。另外, 气候是影响地球关键带最复杂和作用最持久的外在因素, 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。

第二级分类: 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、化学及生物作用最终形成土壤。土壤圈位于岩石圈、

水圈、生物圈及大气圈交界处, 对其他圈层具有重要的交互作用、界面过程及反馈影响(赵其国, 2003)。土壤被视为地球的皮肤, 是地球关键带地下部分的核心组分, 也是最活跃的圈层, 是地球关键带中物质、能量和信息流动与转化的最重要载体之一(Lin, 2010; 朱永官等, 2015)。土壤类型是将具有共性的土壤进行分门别类的量化表达, 高级分类单元是对典型的土壤类型进行概括与归纳, 在大范围的地球关键带类型划分中具有重要的指示作用。因此, 地球关键带第二级分类中增加了土壤类型这一要素。

第三级分类: 在纵向上, 地球关键带的上边界是植物冠层, 下边界是含水层或者基岩层与半风化体的接触面。地球关键带的主体部分存在于地下, 因此, 第三级分类需要考虑到地下水深度与水文地质。为了体现更多的生态信息、土壤发生过程与水文过程, 还需要考虑植被类型、地貌类型与土地利用信息。然而, 水文地质信息包含了地层岩性信息, 可能与部分地区的成土母质信息重复; 植被类型通常取决于气候、土壤类型与地貌类型, 如果同时考虑以上所有要素将导致分区信息冗余。如果考虑的要素数目过多, 会导致生成的区划图图斑更破碎, 不利于生产实践与科学研究的使用。因此, 第三级分类增加了三类地理环境要素: 地下水深度、地貌类型与土地利用, 但这些要素并非需要同时使用。

编码机制: 气候、成土母质与土壤类型的种类超过10但又小于26, 分别使用大小写字母进行标识。地下水深度、地貌类型与土地利用要素的种类数小于10, 使用数字进行标识。为了简化命名, 针对第三级分

表 1 地球关键带的分类级别与命名规则^{a)}

级别	包含要素	理论单元种类	实际单元种类	命名举例	编码举例
第一级	气候、成土母质	10×12	44	暖温带-冲积物区	Cc
第二级	气候、成土母质、土壤类型	10×12×15	100	暖温带-冲积物-锥形土区	CcM
第三级	气候、成土母质、土壤类型、地下水深度、地貌类型、土地利用	10×12×15 ×3×4×6	1448	暖温带-冲积物-锥形土-浅层地下水-平原-农田区	CcM113

a) 地下水深度划分为3级: 0~5m浅层地下水; 5~20m中深层地下水; >20m深层地下水(Fan等, 2013)

区单元新建了一个“缩写名称”的字段, 以凸出主要的影响因素。由于气候要素的重要性, 第三级分区不对气候要素进行简化。考虑到第三级分区涉及到的要素较多, 为了体现编码的继承性, 缩写名称中因简化而删除的要素使用横线作为占位符。如果编码的后几位全是占位符, 则可以省略。

2.2 数据介绍

为了检验所提出分类系统的合理性, 本文以中国为研究样区, 对中国的三级地球关键带单元进行区划。本文使用的数据主要包括成土母质(母岩)、气候、土壤类型、地貌类型(周成虎等, 2009)、地下水深度(Fan等, 2013)与土地利用(2005年)(<http://www.geodata.cn>)。成土母质(母岩)、与气候图层分别由中国成土母质类型图(熊毅, 1986)中国气候区划图(丁一汇, 2013)数字化。

气候数据主要包含了温度带与干湿区类型。成土母质数据主要包含了岩石风化物与松散沉积物两大类, 并包含这两大类的12种子类。基于中国土壤系统分类, 土壤类型图包含了14种土纲与非土壤类型(龚子同等, 1999)。地下水深度数据为Fan等(2013)使用地下水模型与气候、地形与海平面等环境数据预测的结果。地貌类型图以起伏高度为主, 包含了平原、丘陵、山地与台地4种分类单元。中国1:25万土地利用数据是在全国1:10万土地利用数据和遥感分类数据的基础上编制完成, 包含了森林、草地、农田、聚落、水体与荒漠6个类别。

3 结果

3.1 地球关键带区域分布

基于成土母质(母岩)与气候类型, 第一级分区包

含了44个单元(网络版附图1, <http://earthcn.scichina.com>)。由网络版附图1可以看出, 中亚热带-碎屑沉积岩、变质岩区占据了最大的面积(9.2%)(网络版附表1), 此类地球关键带主要分布在长江流域。其次是中温带-碎屑沉积岩、变质岩区(7.2%), 主要分布在内蒙古北部与新疆北部。青藏高原区域的高原亚寒带-碎屑沉积岩、变质岩区与高原温带-碎屑沉积岩、变质岩区也占据了较大的面积(6.6%、6.2%)。

在第一级分区的基础上加入土壤类型这一要素, 经过破碎图斑的融合得到中国地球关键带的第二级分区(网络版附图2)。其中, 中温带-碎屑沉积岩、变质岩-干旱土区的覆盖面积最大(4.3%), 主要分布于内蒙古北部与新疆北部。该地区为典型的干旱土区域, 植被覆盖度低, 降雨稀少。由于锥形土在中国覆盖范围较大, 地球关键带第二级分区图中面积覆盖较大的单元还包括EIM(3.7%)、HIM(3.6%)、IIM(3.2%)与CcM(2.8%)(网络版附表2), 成土母质主要为碎屑沉积岩及相应的变质岩风化物, 气候带为中亚热带(长江流域)、高原温带(青藏高原东部)、高原亚寒带(青藏高原中部)与暖温带(华北平原)。

地球关键带一二级区划具有较好的继承性, 这主要因为土壤类型具有较强的地域规律性。在第二级分区的基础上, 考虑地下水深度、地貌与土地利用要素后, 叠加生成的第三级地球关键带显著提升了图斑的破碎程度(图2)。为了体现这些分区在国家尺度上的空间分布特征, 按照面积百分比排序, 列举前10个最具有代表性的类型(表2)。暖温带-冲积物-锥形土-浅层地下水-平原-农田区(编码: CcM113)面积最大, 为中国总面积的2.08%, 主要分布于华北平原。其次是分布在云贵高原、东南丘陵的中亚热带-碎屑沉积岩、变质岩-锥形土-深层地下水-山地-森林区(EIM331)(2.07%)与分布在云贵高原的中亚热带-碎屑沉积岩、变质岩-淋溶

图2 占国土总面积百分比前10的中国地球关键带第三级分区空间分布(a)、西北地区(b)、华北地区(c)、西南地区(d)和东南地区(e)

土-深层地下水-山地-森林区(EIL331)(2.01%)。

3.2 典型地球关键带特征分析

以中国第三级地球关键带的前10大单元(表2)为例,统计各单元的环境因子信息(表3)。地球关键带深度为地表到风化层底部的垂直厚度(Pelletier等, 2016)。为凸显各要素的宏观影响,将相似的地球关键带单元进行对比分析,如HIM332(高原温带-碎屑沉积岩、变质岩-锥形土-深层地下水-山地-草地区)与IIM332(高原亚寒带-碎屑沉积岩、变质岩-锥形土-深层地下水-山地-草地区)、EkK331(中亚热带-石灰质沉积岩、变质岩-富铁土-深层地下水-山地-森林区)与EkL331(中亚热带-石灰质沉积岩、变质岩-淋溶土-深层地下水-山地-森林区)。

HIM332与IIM332的成土母质、土壤类型与土地利用等要素基本一致,但气候特征有一些区别,例如年均气温分别是5.0和1.0℃。青藏高原地区植物初级生产力较低,有机质的聚积主要是草毡状腐殖质积累过程。微小的温度差异对这两个区域的土壤有机碳浓度产生了巨大影响,例如HIM332与IIM332的土壤有机碳含量分别是27.4和37.5 g kg⁻¹。EkK331与EkL331的环境要素统计没有较大的差别,EkL331地区的高程(1071m)与坡度(5.8°)略高于EkK331地区,但EkK331的年均气温(17.8℃)与年均降雨(1423mm)略高于EkL331。这两个区域的主要区别是土壤类型的差异,体现了不同成土环境对土壤性态特征的影响。EkK331的主要成土过程是脱硅富铝化过程,由于土壤矿物的

表 2 地球关键带第三级分区示例单元命名及编码(占国土总面积百分比前10)

第三级分区	缩写名称	完整编码	缩写编码	地理位置	面积(%)
暖温带-冲积物-雏形土-浅层地下水-平原-农田区	暖温带-雏形土-农田	CeM113	C-M--3	华北平原	2.08
中亚热带-碎屑沉积岩、变质岩-雏形土-深层地下水-山地-森林区	中亚热带-碎屑沉积岩、变质岩-雏形土-山地-森林	EIM331	EIM-31	云贵高原、东南丘陵	2.07
中亚热带-碎屑沉积岩、变质岩-淋溶土-深层地下水-山地-森林区	中亚热带-碎屑沉积岩、变质岩-淋溶土-山地-森林	EIL331	EIL-31	云贵高原	2.01
高原温带-碎屑沉积岩、变质岩-雏形土-深层地下水-山地-草地区	高原温带-雏形土-草地	HIM332	H-M--2	青藏高原	2.00
高原亚寒带-碎屑沉积岩、变质岩-雏形土-深层地下水-山地-草地区	高原亚寒带-雏形土-草地	IIM332	I-M--2	青藏高原	1.76
中亚热带-碎屑沉积岩、变质岩-富铁土-深层地下水-山地-森林区	中亚热带-碎屑沉积岩、变质岩-富铁土-山地-森林	EIK331	EIK-31	云贵高原、东南丘陵	1.52
中亚热带-石灰质沉积岩、变质岩-淋溶土-深层地下水-山地-森林区	中亚热带-石灰质沉积岩、变质岩-淋溶土-山地-森林	EkL331	EkL-31	云贵高原	1.45
中亚热带-石灰质沉积岩、变质岩-富铁土-深层地下水-山地-森林区	中亚热带-石灰质沉积岩、变质岩-富铁土-山地-森林	EkK331	EkK-31	东南丘陵	1.36
南亚热带-碎屑沉积岩、变质岩-富铁土-深层地下水-山地-森林区	南亚热带-碎屑沉积岩、变质岩-富铁土-山地-森林	FIK331	FIK-31	云贵高原、东南丘陵	1.10
暖温带-沙漠-中深层地下水-丘陵区	暖温带-沙漠-中深层地下水	CeO226	Ce-2	塔里木盆地	1.04

表 3 典型地球关键带第三级分区的部分环境指标(平均值±标准差)^{a)}

环境指标	CeM113	CeO226	EkK331	EkL331	EIK331	EIL331	EIM331	FIK331	HIM332	IIM332
年均气温(℃)	13.1±1.7	11.1±0.6	17.8±1.9	16.6±2.6	16.4±4.2	14.1±3.4	15.2±3.0	20.1±1.6	5.0±4.0	1.0±2.6
年均降雨(mm)	684±146	36±10	1423±246	1318±228	1370±424	1049±280	1163±347	1510±296	525±167	542±122
干燥度	1.3±1.1	19.4±2.6	0.8±0.1	0.8±0.1	0.7±0.1	0.8±0.3	0.8±0.3	0.8±0.2	0.3±1.0	0.1±0.3
日照时数(h)	2454±200	2848±119	1517±228	1436±239	1798±356	1712±495	1880±466	1969±163	2564±423	2513±258
高程(m)	40±94	1157±155	701±466	1071±546	744±552	1730±893	1463±1107	1068±634	4245±756	4558±509
坡度(°)	0.1±0.2	0.4±0.4	5.0±3.3	5.8±4.5	5.6±4.1	9.0±6.3	7.7±5.7	6.2±4.0	8.0±5.1	5.9±3.9
土壤有机碳含量(g kg ⁻¹)	8.9±1.8	5.5±0.8	17.7±3.1	17.7±4.6	17.6±3.8	18.3±5.8	17.3±4.9	18.8±4.1	27.4±13.3	37.5±14.9
土壤pH	7.7±0.5	8.5±0.1	5.2±0.6	5.6±0.7	5.2±0.7	5.9±0.7	5.7±0.8	5.1±0.4	7.3±0.8	7.3±0.7
土壤全氮(g kg ⁻¹)	0.9±0.2	1.1±0.4	1.6±0.3	1.7±0.3	1.4±0.3	1.6±0.4	1.5±0.3	1.5±0.3	2.5±1.1	3.1±1.1
土壤全磷(g kg ⁻¹)	0.6±0.2	0.2±0.1	0.5±0.1	0.5±0.1	0.5±0.1	0.6±0.1	0.5±0.1	0.4±0.1	0.8±0.1	0.9±0.2
土壤全钾(g kg ⁻¹)	16.8±2.8	6.7±1.5	16.3±2.5	16.7±3.6	16.2±2.6	17.0±2.9	17.3±2.5	15.3±3.3	15.5±3.4	16.4±2.6
地球关键带深度(m)	49.0±6.2	26.1±16.6	1.1±1.2	1.1±0.9	1.2±2.3	1.0±0.9	1.0±1.0	1.2±2.0	0.8±1.0	0.8±1.0

a) 粗体表示每一种环境因子中平均值的最大值。表层(0~20cm)土壤属性根据数字土壤图(2010s)统计(Song等, 2020)

风化,形成了弱碱性条件,可溶性盐、碱金属和碱土金属盐基及硅酸大量流失,导致了铁、铝在土体内相对富集。EkL331地区的主要发生过程是黏化作用,风化成土过程中黏粒的生成、迁移与淀积导致了特定土层中黏粒含量增加的现象(黏化层)。

3.3 中国典型地球关键带观测站及其类型

地球关键带中发生的物理、化学和生物过程均与人类活动密切相关,在不同的地理区域起主导作用的环境因子也迥异。中国新近在生态系统研究网络(CERN)的基础上,基于研究项目先后在4个典型生态

站开展了以地球关键带观测为标准的系统观测(张甘霖等, 2019)(表4), 并开展了地球关键带过程与生态系统服务功能研究. 由于喀斯特地区特殊的成土母质, 中国喀斯特地区人地矛盾突出, 主要体现在石漠化的快速扩展(刘鸿雁等, 2019)、成土物质的先天不足(钱庆欢等, 2018)等, 不同等级的地球关键带分类对于理解区域尺度上碳酸盐岩岩石对土壤存量与物质循环的影响提供了有效的数据支撑(Wang等, 2020). 土壤在地球关键带中的核心地位导致土壤安全能够显著影响其他的要素, 这一点在城郊区域尤为显著(朱永官等, 2015). 地球关键带分类信息的综合利用, 有助于城市/城郊关键带对于生物地球化学循环及不同土地利用类型下物质的时空分布规律的认识(Tang等, 2019; Tang等, 2020), 进而为促进城市/城郊的和谐发展提供指导. 中国红壤地区的低山丘陵长期受亚热带季风气候的影响, 雨季旱季分明(汪亚及等, 2019), 集约化的农业对当地的生态保护带来了潜在的威胁(Tahir等, 2016; Wu等, 2019), 准确识别红壤地区的成土母质、土壤类型、地下水深度等土壤信息的空间分布特征(Song等, 2019), 对于正确理解自然和人为作用下红壤风化与形成的关键过程、速率及其驱动机制具有一定的借鉴意

义. 由于独特的地貌特征与地理位置, 黄土高原有近2/3的地区处于干旱/半干旱地区(Shao等, 2018), 退耕还林还草实施了20年, 已导致黄土高原的土地利用发生了剧烈的变化, 这与该地区人为扰动、气候与成土母质的主导作用密切相关(表4), 因此, 黄土高原关键带的构建, 系统研究了季风区黄土高原多尺度土壤水文过程, 阐明了土壤水文过程对重大生态工程的响应机制, 对于评估黄土高原生物和工程治理的环境效应具有重要的参考价值.

4 讨论

4.1 地球关键带类型的分布特征

在区划原则上, 传统的地理对象区划较多围绕一种或多种要素在水平/垂直维度的空间分异特征, 地球关键带的分类体系在某种程度上借鉴了综合自然区划的思想(表5)(郑度等, 2005). 在区划方法上, 传统的地理对象区划往往采用多种地理要素, 特别注重地理要素空间分异特征的主要因素, 例如中国综合自然地理区划中自然区(第一级单元)的划分综合考虑了气候与地貌等指标在不同地区的重要性(倪绍祥, 1994). 本文

表 4 中国已建立典型地球关键带观测站的特征分析

环境信息	喀斯特关键带	城市/城郊关键带	红壤关键带	黄土高原关键带
地球关键带 三级分区	中亚热带-碎屑沉积岩、 变质岩-淋溶土-深层地下水- 山地-草地区	北亚热带-黄土-人为土- 深层地下水-山地-森林区	中亚热带-碎屑沉积岩、 变质岩-人为土-中深层地下 水-平原-农田区	暖温带-碎屑沉积岩、 变质岩-锥形土-深层地下水- 平原-森林区
地理位置	贵州省普定县	浙江省宁波市	江西省鹰潭市	陕西省洛川县
气候带	中亚热带	北亚热带	中亚热带	暖温带
高程(m)	1170	200	50	1106
年均气温(°C)	15.1	18.1	17.7	10.0
年均降雨(mm)	1367	1382	1795	600
主要成土母质	石灰岩	河流冲积物	红砂岩	黄土
主要土壤类型	淋溶土	人为土	人为土	锥形土
主要农作物	水稻、小麦、玉米	水稻、玉米	水稻、花生	小麦、高粱、玉米
研究重点	喀斯特土壤-植被相互作用 与生态系统功能	城乡双重特性过渡地带的 生物地球化学循环	地球关键带演化过程 与水土资源安全	水土过程及其对生态系统服务 功能影响的观测与模拟
重要发现	植被-水文-生物地球化学耦 合机理及生态系统服务提升 机制	城郊土壤生态系统服务所 涉及到的安全问题	自然和人为作用下红壤风化 与形成的关键过程、速率及 其驱动机制	多尺度水土过程的空间变异 规律和机制, 及其对重大 生态工程的响应机制
社会经济价值	服务于区域石漠化治理, 区域经济可持续发展	指导城乡双重特性过渡地带的 土壤环境治理	服务于土壤水土资源 安全可持续管理	为人地系统耦合与区域经济 可持续发展提供支撑
生态意义	喀斯特脆弱的生态系统功能 恢复	城郊生态系统服务评价	红壤生态系统抵御退化的能 力及可恢复性评价	区域生态系统服务评估

表 5 与相关地理区划研究的对比^{a)}

相关工作	文献引用	主要对象	主要目的	区划依据	命名规则与示例
中国地球关键带区划	本研究	地球表层系统	反映不同圈层的交叉作用机理、形成演化影响因素	气候、成土母质、土壤类型、地下水深度、地貌类型、土地利用	多要素叠加, 例如北亚热带-石灰质沉积岩、变质岩-淋溶土区(第二级)
中国植被区划	吴征镒, 1980	植被类型	反映植被类型空间分布特征	主要植被类型、气候带	气候带与植被类型, 例如东部(湿润)常绿阔叶林亚区域(第二级)
中国综合农业区划	周立三, 1981	农业	为农业发展规划提供指导	农业发展的地域差异	地区与农业类型, 例如豫皖鄂平原山地农林区(第二级)
中国综合自然地理区划	倪绍祥, 1994	自然地理	认识自然地理综合体的地域分异规律	主导因素: 气候、高程、土壤类型或植被类型	地区与地形, 例如淮阳山地小区(第三级)
中国水文区划	熊怡和张家桢, 1995	水文	反映中国水文资源空间分布特征	径流、降雨量	地区、气候带与水量, 例如秦巴、大别山北亚热带多水区(第一级)
中国生态区划	傅伯杰等, 2001	生态环境	服务于生态环境建设和环境管理政策的制订	自然地域特点、生态系统类型、区域环境问题和人类活动状况	地区与生态系统类型, 例如大别山-天目山常绿阔叶林生态区(第三级)
中国生态地理区划	吴绍洪等, 2003	生态地理	综合反映宏观生态系统地带性分布特征	温度带、自然地区	地区, 例如淮南与长江中下游
全国生态功能区划	国家环境保护部和中国科学院, 2008	生态功能	确定不同区域的主导生态功能	区域生态特征、生态系统服务功能与生态敏感性	地区与主导生态调节功能, 例如大别山水源涵养重要区(第一级)
中国气候区划	郑景云等, 2010	气候	认识中国气候区域分布规律和特征	气温、干湿特征	地区、温度带与干湿特征, 例如大别山与苏北平原北亚热带湿润地区(第三级)
中国土壤区划	龚子同等, 2014	土壤类型	揭示土壤群体特征和分布规律	土壤类型地带性分布	气候带、地区与土壤类型, 例如大别山、桐柏山铁质湿润锥形土、水耕人为土区(第三级)
中国地貌区划	程维明等, 2019	地貌	认识中国区域地貌分布特征	地貌形态、成因及发育的相似性和差异性	地区、地貌营力与地貌形态, 例如太行山山前洪冲积平原区(第三级)

a) 为便于区分与对比, 以各区划图中大别山(北亚热带、长江与淮河的分水岭)地区的命名为例

提出了一套地球关键带三级分类的原则与具体方法, 并以中国为研究区, 初步显示了该分类体系在地球关键带区划应用的合理性. 与传统的地理对象区划不同(表5), 本文提出的分类体系更多的是对地球关键带这一地球表层综合体进行表征、命名与归类, 具有一定的普适性, 有望在更多的地理区域进行尝试. 应指出, 由于地球关键带的演化离不开多圈层中物理、化学、水文过程的耦合, 仅仅凸显个别要素的主导作用难以充分体现各分区间的异同. 这也间接导致了使用叠置法制作的第三级分区命名较长、要素众多(表2), 在实际使用过程中需要参考相关工作的编码机制(程维明等, 2019), 同时需要有进一步的研究依据过程和功能

的异同进行区域的合并或者拆分.

以中国为例, 应用该分类体系对中国典型地球关键带群体进行区域的划分与归纳. 它是综合自然区划的组成部分, 也是农业区划、生态环境规划、国土整治区划的基础. 中国国土辽阔, 自然环境独特, 地球关键带类型多样, 其特征和组合分布的地区差异极大(陈发虎等, 2019). 从气候、地貌到地下水类型、深度, 地球关键带的三级分区能够较好地反映中国不同区域典型地理单元的特征(表3). 由于中国人口众多, 耕地和水资源相对紧缺, 生态环境退化, 人口需求与资源供给之间的矛盾日益尖锐. 从地球关键带研究视角出发, 综合水、土、气、生、岩间的过程及其对生态系统服

务功能的影响, 实现因地制宜、分区规划、分类指导, 有望为生态系统管理和决策提供依据(曹世雄等, 2018).

据不完全统计, 中国科学院已先后构建了212个野外台站(<http://www.cas.cn/zt/kjzt/ywtz/>), 不同台站网络的建立基本上围绕了不同的主题, 例如中国生态系统研究网络(CERN)、中国科学院特殊环境与灾害监测网络、中国科学院日地空间环境观测台链等. 以CERN为例, 台站的选址主要围绕中国主要的生态系统. 一方面, 对比已构建的CERN台站与第二级地球关键带区划图, 可以发现这些台站基本上属于不同的地球关键带类型区(网络版附图2), 相关台站的扩建需要考虑更多的代表性生态地理区域系统, 考虑更多气候、土壤、植被等要素的地域差异, 以丰富中国生态环境监测网络. 另一方面, 尽管已经较为系统地涵盖了具有中国代表性的生态系统, 也充分兼顾考虑了生物与非生物要素的地理相关性, 但从代表性的地球关键带空间分布特征来看(图2), 这些CERN台站未来可进一步考虑地理要素在同一生态系统内部的空间变异性(表3).

地球关键带第一级、二级分区的重要差别是对土壤类型的考虑. 这是因为土壤是地球关键带的核心组成部分, 这种核心不仅体现在土壤圈位于各大圈层的交界处, 也体现在地球关键带各种过程发生最为密集的区域(Lin, 2010; Grunwald等, 2011; Guo和Lin, 2016).

地球关键带具有明显的地域性, 是涉及不同圈层作用的综合研究(张甘霖等, 2019). 然而, 自然资源和生态功能的分布格局复杂多变, 其形成和演变是一个复杂的非线性过程, 不同区划单元由于自然或人为因素存在着水平方向的空间耦合关系. 不同等级的分区充分体现了这一点(网络版附表1、附表2). 以第一级分区中的北亚热带-湖积物区(编码: Dg; 网络版附图1)为例, 该单元的二级分类进一步划分为北亚热带-湖积物-雏形土区(DgM)与北亚热带-湖积物-人为土区(DgB). 尽管这两个区域因土壤类型的不同而划分为两个独立的区域, 但是该区域由于人口密度大、社会经济发达、交通便利存在着频繁的社会经济互动, 高级别的类型(网络版附图1)更能作为具体应用的研究、评价和管理提供合适的区划边界.

结合部分地球关键带类型的分布特征与环境指标分析, 可以发现某些主导环境要素是导致地球关键带

单元具有明显差异的主因(表3; 图2). 类似地, 国际上已有一系列地球关键带观测站重点关注某一地理要素在地球关键带演化过程中的作用. 例如美国的页岩山(Susquehanna Shale Hills)关键带观测站(SSHCZO)重点关注普遍存在的页岩基岩对于森林水利用、山地流域建模与土壤水分动态的影响, 通过实时传感器监测受气候变化与人为扰动影响的环境退化. 南部山脉(Southern Sierra)关键带观测站(SSCZO)重点关注水循环尤其是雨-雪转换过程对于地球关键带过程的驱动及其对气候变化的响应. 博尔德河(Boulder Creek)关键带观测站(BCCZO)重点关注小流域过程观测与模拟, 理解土壤侵蚀与岩石风化对于地球关键带结构演变的影响(<http://criticalzone.org/national>).

4.2 地球关键带分类与区划在地球关键带科学中的应用

作为固态地球及其流体包裹体的动态界面, 地球关键带由一系列物理、化学、生物过程的复杂联系与反馈所驱动. 这些过程大致可以分为4类: (1) 地质构造: 由地幔中的能量驱动, 通过岩浆、断层、隆起、塌陷等方式影响地表宏观形态; (2) 风化作用: 主要受大气圈与水文圈动力驱动, 主导了土壤发育、侵蚀等过程; (3) 流体运动: 受气压梯度驱动, 影响景观特征并对物质进行再分配; (4) 生物活性: 由营养元素主导, 影响了岩石、土壤、水、空气中的化学循环(National Research Council, 2001). 上述非线性地球关键带过程的时空跨度非常大, 例如从分子级的土壤微生物到全球尺度的生物群落、从土壤的瞬时状态到第四纪的沉积过程. Guo和Lin(2016)将现有地球关键带研究的特征归纳为“深时(Deep time)”、“深度(Deep depth)”与“深耦合(Deep coupling)”. 2007年, 美国国家科学基金会批准了首批地球关键带观测站(Anderson等, 2008), 以加深地表过程耦合与集成的理解.

上述地球关键带过程(物理、化学和生物过程)控制了土壤发育、地下水分布与质量、化学元素循环等, 并显著调节了各种能量与矿产资源的发生. 本文的分类方案综合考虑了地球关键带过程涉及到的不同圈层在交叉作用机理、形成演化影响因素、组成与结构特点等因素上的差异, 系统地将迥异的地理要素进行合并归纳, 筛选出了具有一定空间相似性的地理单元. 这也符合当前研究的趋势——地球关键带演化与功能

的统一理论框架(Duffy等, 2014), 例如, 现有研究正试图将水文、地球化学、地貌与生物过程的耦合关系构建综合的概念模型(Grimaud等, 2015; Guo和Lin, 2016; Xu和Liu, 2017). 因此, 准确地理解地球关键带类型对不同时空尺度的地球表层系统过程的影响与表征作用能够更好地促进不同圈层交互作用的研究, 进而有效地从宏观视角评估人类活动对于地表的影响.

从生态功能角度出发, 地球关键带区划能够为生态区域识别提供详实的数据支持(樊杰, 2015; 金佳鑫等, 2016). 金佳鑫等(2016)使用气候、土壤、遥感影像进行生态区域划分, 更侧重于减少生态区域内部土地覆盖类型对于生态区域划分的影响. 从社会经济角度出发, 樊杰(2015)采用地域功能识别指标体系评价了中国的的功能适宜性, 进而总结国土空间保护和利用基本格局的建议. 与上述研究不同的是, 本文从地球关键带演化的宏观视角出发, 使用地球关键带科学研究中的核心地理要素构建了三级区划单元图, 这些不同等级的区划单元不仅能够揭示各级单元的地理位置与各要素的空间分异特征, 也能够从微观角度定性各级区划单元在地球表层系统的特征及其相互作用过程.

需要指出的是, 区划的目的、原则与指标决定了诠释的视角与具体应用的目标导向, 地理要素的综合程度与单一要素的凸显度是成反比的, 这也间接导致了综合性区划工作不如部门/单要素区划的应用价值高(郑度等, 2005; 樊杰, 2019). 地球关键带分类与区划具有实践和科学认识的双重目的, 基于划分的多等级类型, 地球关键带研究可以立足其演化对区域水资源、土壤功能、生态环境等的影响. 本文提出的三级分类体系综合了地球表层自然环境要素和人为要素的特征, 如气候、地下水、地形、成土母质和土地利用, 对这些要素的综合分类客观反映了各区域的水土资源、环境承载力与生态功能状况的宏观分布, 能够在一定程度上为生态环境保护和资源开发利用提供数据与决策支持. 不同等级的中国地球关键带类型区划(网络版附图1和附图)在实际应用中还需要与其他的专题图进行有机的结合, 例如全国生态功能区划(国家环境保护部和中国科学院, 2008)、中国生态区划(傅伯杰等, 2001)等.

地球关键带科学涉及到诸多学科, 绝大多数研究需要借助详实的调查数据来验证科学假设(陈发虎等,

2019), 获得对地球表层系统多过程耦合关系的认知. 然而, 目前大多数的地球关键带研究集中在单一观测站分析结果, 较少关注不同观测站研究的对比分析(Guo和Lin, 2016). 尽管当前的观测区域具有独特的结构与过程特征, 但是不同类型地球关键带之间所呈现的共性规律尚未得到足够的重视. 基于此, 相关研究的另一挑战是如何将不同时间序列的多站点观测数据进行系统的整合、同化, 通过网络协作的方式揭示普适的地球关键带结构特征、演化与过程机理(Bui, 2016). 尺度转换技术为此提供了一定的思路指导. 升尺度转换是将高空间分辨率、小空间范围(小尺度)的信息推译至低空间分辨率、大空间范围(大尺度). 基于地球关键带类型的分析(表4), 可以综合归纳不同气候、母质、土壤类型条件下, 地球关键带过程所体现的特征在空间上的分布规律, 进而为相似、临近区域的科学研究提供借鉴. 如果假设这些相近的地理单元具有同构的特性, 部分地球关键带观测站的实时/准实时多传感器观测数据、动态耦合过程测量、不同时空尺度的地球关键带过程理解可望构建升尺度模型, 进而服务于区域生态系统评估(曹世雄等, 2018).

5 结论与展望

本文提出的地球关键带三级分类体系更多的是对地球表层综合体进行表征、命名与归类, 以中国地球关键带的类型划分为例, 证明了该分类体系一定程度的可行性, 有望在不同空间尺度的地理区域进行尝试. 地球关键带分类与区划是综合自然区划的组成部分, 也是农业区划、生态环境规划、国土整治等的基础. 地球关键带研究具有明显的地域性, 是涉及不同圈层作用的综合研究, 其研究的重要趋势是地球关键带演化与功能的统一理论框架, 应基于不同的耦合过程模型来追踪物质与能量的转移与转换过程, 进而揭示地球关键带功能对于人为活动、气候变化与地质构造驱动力的响应机理. 结合文献综述与本文工作, 未来这一主题的科学研究不能仅停留在基于小流域或站点观测. 本研究提供的地球关键带区划具有实践和科学认识的双重目的, 可以作为地球表层系统研究的出发点与综合框架. 结合地球关键带类型构建定量升尺度模型, 综合分析不同气候、母质、土壤类型条件下, 地球关键带过程所体现的特征在空间上的分布规律, 能

够为相似、临近区域的科学研究提供借鉴, 有望更好的服务于区域生态系统规划。

致谢 感谢周成虎院士、郑春苗教授、郑元润研究员在实验过程中提供的中国地貌、气候与植被数据。感谢国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)提供土地利用数据支撑。

参考文献

- 曹世雄, 刘玉洁, 苏蔚, 郑鑫怡, 余中淇. 2018. 中国陆地生态系统服务净价值评估. 中国科学: 地球科学, 48: 331–339
- 陈发虎, 傅伯杰, 夏军, 吴铎, 吴绍洪, 张镭铨, 孙航, 刘禹, 方小敏, 秦伯强, 李新, 张廷军, 刘宝元, 董治宝, 侯书贵, 田立德, 徐柏青, 董广辉, 郑景云, 杨威, 王鑫, 李再军, 王飞, 胡振波, 王杰, 刘建宝, 陈建徽, 黄伟, 侯居峙, 蔡秋芳, 隆浩, 姜明, 胡亚鲜, 冯晓明, 莫兴国, 杨晓燕, 张东菊, 王秀红, 尹云鹤, 刘晓晨. 2019. 近70年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望. 中国科学: 地球科学, 49: 1659–1696
- 程维明, 周成虎, 李炳元, 申元村. 2019. 中国地貌区划理论与分区体系研究. 地理学报, 74: 839–856
- 丁一汇. 2013. 中国自然地理系列专著: 中国气候. 北京: 科学出版社
- 樊杰. 2015. 中国主体功能区划方案. 地理学报, 70: 186–201
- 樊杰. 2019. 中国人文地理学70年创新发展与学术特色. 中国科学: 地球科学, 49: 1697–1719
- 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 2001. 中国生态区划方案. 生态学报, 21: 1–6
- 龚子同, 黄荣金, 张甘霖. 2014. 中国土壤地理. 北京: 科学出版社
- 龚子同, 等. 1999. 中国土壤系统分类——理论·方法·实践. 北京: 科学出版社
- 国家环境保护部, 中国科学院. 2008. 全国生态功能区划. 北京: 国家环境保护部, 中国科学院
- 金佳鑫, 王颖, 江洪, 孔艳, 卢学鹤, 张秀英. 2016. 基于遥感和典范对应分析方法优化生态地理分区——以中国区域为例. 中国科学: 地球科学, 46: 1188–1196
- 刘鸿雁, 蒋子涵, 戴景钰, 吴秀臣, 彭建, 王红亚, Meersmans J, Green S M, Quine T A. 2019. 岩石裂隙决定喀斯特关键带地表木本与草本植物覆盖. 中国科学: 地球科学, 49: 1974–1981
- 陆大道, 郭来喜. 1998. 地理学的研究核心——人地关系地域系统——论吴传钧院士的地理学思想与学术贡献. 地理学报, 53: 97–105
- 倪绍祥. 1994. 中国综合自然地理区划新探. 南京大学学报, 30: 706–714
- 钱庆欢, 王世杰, 白晓永, 周德全, 田义超, 李琴, 吴路华, 肖建勇, 曾成, 陈飞. 2018. 基于允许流失量和正负地形源汇理论的喀斯特关键带土壤侵蚀研究. 地理学报, 73: 2135–2149
- 汪亚及, 高磊, 彭新华. 2019. 红壤农田小流域径流组分对氮素流失动态的影响. 中国科学: 地球科学, 49: 1960–1973
- 吴绍洪, 杨勤业, 郑度. 2003. 生态地理区域系统的比较研究. 地理学报, 58: 686–694
- 吴征镒. 1980. 中国植被. 北京: 科学出版社
- 熊毅. 1986. 中国土壤图集. 北京: 地图出版社
- 熊怡, 张家桢. 1995. 中国水文区划. 北京: 科学出版社
- 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. 中国科学: 地球科学, 49: 1945–1947
- 赵其国. 2003. 发展与创新现代土壤科学. 土壤学报, 40: 321–327
- 赵松乔. 1983. 中国综合自然地理区划的一个新方案. 地理学报, 38: 1–10
- 赵松乔, 孙惠南, 黄荣金, 杨勤业等. 1988. 现代自然地理. 北京: 科学出版社
- 郑度, 葛全胜, 张雪芹, 何凡能, 吴绍洪, 杨勤业. 2005. 中国区划工作的回顾与展望. 地理研究, 24: 330–344
- 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 2010. 中国气候区划新方案. 地理学报, 65: 3–12
- 周成虎, 程维明, 钱金凯, 李炳元, 张百平. 2009. 中国陆地1:100万数字地貌分类体系研究. 地球信息科学学报, 11: 707–724
- 周立三. 1981. 中国综合农业区划. 北京: 农业出版社
- 朱永官, 李刚, 张甘霖, 傅伯杰. 2015. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务. 地理学报, 70: 1859–1869
- Anderson S P, Bales R C, Duffy C J. 2008. Critical zone observatories: Building a network to advance interdisciplinary study of earth surface processes. *Mineral Mag*, 72: 7–10
- Banwart S, Bernasconi S M, Bloem J, Blum W, Brandao M, Brantley S, Chabaux F, Duffy C, Kram P, Lair G, Lundin L, Nikolaidis N, Novak M, Panagos P, Ragnarsdottir K V, Reynolds B, Rousseva S, de Ruiter P, van Gaans P, van Riemsdijk W, White T, Zhang B. 2011. Soil processes and functions in Critical Zone Observatories: Hypotheses and experimental design. *Vadose Zone J*, 10: 974–987
- Batjes N H. 2008. Mapping soil carbon stocks of Central Africa using SOTER. *Geoderma*, 146: 58–65
- Bui E N. 2016. Data-driven Critical Zone science: A new paradigm. *Sci Total Environ*, 568: 587–593
- Duffy C, Shi Y, Davis K, Slingerland R, Li L, Sullivan P L, Goddris Y, Brantley S L. 2014. Designing a suite of models to explore critical zone function. *Procedia Earth Planet Sci*, 10: 7–15
- Fan Y, Li H, Miguez-Macho G. 2013. Global patterns of groundwater table depth. *Science*, 339: 940–943
- Giardino J R, Houser C. 2015. Principles and dynamics of the critical zone. In: Shroder J J F, eds. *Developments in Earth Surface Processes*. Amsterdam: Elsevier. 1–13

- Grimaud J L, Chardon D, Metelka V, Beauvais A, Bamba O. 2015. Neogene cratonic erosion fluxes and landform evolution processes from regional regolith mapping (Burkina Faso, West Africa). *Geomorphology*, 241: 315–330
- Grunwald S, Thompson J A, Boettinger J L. 2011. Digital soil mapping and modeling at continental scales: Finding solutions for global issues. *Soil Sci Soc Am J*, 75: 1201–1213
- Guo L, Lin H. 2016. Critical zone research and observatories: Current status and future perspectives. *Vadose Zone J*, 15: 1–14
- Igué A M, Gaiser T, Stahr K. 2004. A soil and terrain digital database (SOTER) for improved land use planning in Central Benin. *Eur J Agronomy*, 21: 41–52
- Lin H. 2010. Earth's Critical Zone and hydopedology: Concepts, characteristics, and advances. *Hydrol Earth Syst Sci*, 14: 25–45
- Lü Y, Hu J, Fu B, Harris P, Wu L, Tong X, Bai Y, Comber A J. 2019. A framework for the regional critical zone classification: The case of the Chinese Loess Plateau. *Natl Sci Rev*, 6: 14–18
- National Research Council. 2001. Basic Research Opportunities in Earth Sciences. Washington D C: National Academy Press. 1–154
- Pelletier J D, Broxton P D, Hazenberg P, Zeng X, Troch P A, Niu G Y, Williams Z, Brunke M A, Gochis D. 2016. A gridded global data set of soil, intact regolith, and sedimentary deposit thicknesses for regional and global land surface modeling. *J Adv Model Earth Syst*, 8: 41–65
- Shao M, Wang Y, Xia Y, Jia X. 2018. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the critical zone of the Loess Plateau: A review. *Vadose Zone J*, 17: 170077
- Song X D, Wu H Y, Liu F, Tian J, Cao Q, Yang S H, Peng X H, Zhang G L. 2019. Three-dimensional mapping of organic carbon using piecewise depth functions in the Red Soil Critical Zone Observatory. *Soil Sci Soc Am J*, 83: 687–696
- Song X D, Wu H Y, Ju B, Liu F, Yang F, Li D C, Zhao Y G, Yang J L, Zhang G L. 2020. Pedoclimatic zone-based three-dimensional soil organic carbon mapping in China. *Geoderma*, 363: 114145
- Tahir M, Lv Y, Gao L, Hallett P D, Peng X. 2016. Soil water dynamics and availability for citrus and peanut along a hillslope at the Sunjia Red Soil Critical Zone Observatory (CZO). *Soil Tillage Res*, 163: 110–118
- Tang J, Wang W, Yang L, Qiu Q, Lin M, Cao C, Li X. 2020. Seasonal variation and ecological risk assessment of dissolved organic matter in a peri-urban critical zone observatory watershed. *Sci Total Environ*, 707: 136093
- Tang Q, Ti C, Xia L, Xia Y, Wei Z, Yan X. 2019. Ecosystem services of partial organic substitution for chemical fertilizer in a peri-urban zone in China. *J Cleaner Production*, 224: 779–788
- Van Engelen V W P. 1993. Global and national soils and terrain digital databases (SOTER) procedures manual. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, The Netherlands
- Wang Y, Luo W, Zeng G, Peng H, Cheng A, Zhang L, Cai X, Chen J, Lyu Y, Yang H, Wang S. 2020. Characteristics of carbon, water, and energy fluxes on abandoned farmland revealed by critical zone observation in the karst region of southwest China. *Agr Ecosyst Environ*, 292: 106821
- Wu H, Song X, Zhao X, Peng X, Zhou H, Hallett P D, Hodson M E, Zhang G L. 2019. Accumulation of nitrate and dissolved organic nitrogen at depth in a red soil Critical Zone. *Geoderma*, 337: 1175–1185
- Xu X, Liu W. 2017. The global distribution of Earth's critical zone and its controlling factors. *Geophys Res Lett*, 44: 3201–3208
- Zhang G L, Zhao Y G. 2008. SOTER database for China, Scale 1:1 Million. Nanjing: Institute of Soil Science, Chinese Institute of Soil Science

(责任编辑: 陈利顶)