

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2021.03.001

基于地球关键带科学的土壤生态系统服务评价方法研究

张 丽¹, 夏 炎^{1,2,4}, 陈 琪¹, 马禧帅¹, 王晓丹¹, 杜文超³, 尹 颖¹, 郭红岩^{1,2*}

(1. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 南京, 210023;

2. 南京大学地球关键带科学与技术国际研究中心, 南京大学, 南京, 210023;

3. 南京师范大学环境学院, 南京, 210023; 4. 宁夏回族自治区煤炭地质勘查院, 银川, 750004)

摘 要: 土壤是地球关键带的核心, 为人类提供着重要的生态系统服务。在集成已有土壤生态系统服务评价方法的基础上, 充分考虑土壤与地球关键带各介质的关联作用, 提出了基于地球关键带科学的土壤生态系统服务评价方法。采用文献整理法、单因素评价模型以及 GIS 空间分析等方法, 构建了基于地球关键带科学的土壤生态系统服务的评价指数系统, 包括土壤质量指数(SQI)、植物指数(PI)、大气调节指数(ARI)、径流指数(RI)、地下水补给指数(GSI)以及文化美学指数(CAI), 建立地球关键带系统中土壤支持、供给、调节和文化服务等多重服务功能的集成评估模型与方法。研究结果对于识别土壤功能失衡、系统提升土壤以及地球关键带生态服务功能具有一定的参考价值。

关键词: 地球关键带, 土壤生态系统服务, 多指数系统, 评价方法

中图分类号: X14

文献标志码: A

Research on soil ecosystem service assessment method based on Earth's Critical Zone science

Zhang Li¹, Xia Yan^{1,2,4}, Chen Qi¹, Ma Xishuai¹, Wang Xiaodan¹, Du Wenchao³, Yin Ying¹, Guo Hongyan^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing,

210023, China; 2. Joint International Research Centre for Critical Zone Science by University of Leeds and Nanjing

University, Nanjing University, Nanjing, 210023, China; 3. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing,

210023, China; 4. Coal Geological Exploration Institute of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan, 750004, China)

Abstract: Soil is the core layer of the Earth's critical zone, which provides important ecosystem services for human beings. Based on the integration of existing soil ecosystem services evaluation methods, considering the relationship between soil and the media of Earth's Critical Zone, the soil ecosystem services based on the science of Earth's Critical Zone was proposed. By using the methods of literature review, single factor evaluation model and GIS spatial analysis, the evaluation index system of soil ecosystem services based on Earth Critical Zone was constructed, including soil quality index (SQI), plant index (PI), atmospheric regulation index (ARI), runoff index (RI), groundwater supply index (GSI) and cultural aesthetics index (CAI). The integrated evaluation model and methods of soil supporting, provisioning, regulating and cultural services in Earth's Critical Zone were established. The results can be used for identifying the imbalance of soil function, improving soil and the ecosystem service function of the Earth's critical zone.

Key words: Earth's Critical Zone, soil ecosystem service, multi index system, evaluation method

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0800201), 国家自然科学基金委国际(地区)合作与交流项目(41571130061)

收稿日期: 2021-04-24

* 通讯联系人, E-mail: hyguo@nju.edu.cn

土壤特殊自然资产为人类提供的福祉称为土壤生态系统服务,包括支持服务、供给服务、调节服务和文化服务等多重功能^[1]. 由于对土壤生态系统服务缺乏全面了解,土壤受到人类长期无节制的索取和破坏,出现了生态系统服务功能退化现象^[2]. 土壤生态服务功能评价是提升其功能的基础^[3-6],常用方法为价值量评估法^[7-9]和物质量评估法^[10-11]. 价值评价法使用简便,但容易忽略土壤生态系统服务的多样性和不均衡性. 物质量评估方法发展较为成熟,对供给服务、调节服务和支撑服务的评价指标探究较多,但评价指标往往不一致,同时忽略了文化服务这一重要内容. 因此,当前亟待研究建立全面评价土壤生态系统服务的方法,以便更好地服务于土壤环境治理和土壤环境保护.

作为与人类联系最密切的地球表层,地球关键带在维持和支撑经济社会发展方面具有重要作用^[12]. 土壤是关键带的核心,在地球关键带各介质间起到纽带作用,土壤生态系统服务功能的发挥直接影响到地球关键带功能的可持续性^[13],充分考虑土壤与关键带相关介质的耦合作用,本文尝试构建基于地球关键带科学的土壤生态系统服务评价指标体系,建立综合土壤生态系统服务各项功能的评价方法,为评价和指导“山水林田湖草”生命共同体建设和土壤生态修复与功能提升提供科学支撑.

1 指标体系的构建

1.1 指标的选取原则 评估方法中的指标体系是指由能够表征指标特征及互为联系的其他指标所构成的具有协调性的有机整体^[14],土壤生态系统服务评估则需要确定服务背后的土壤过程,用于量化土壤过程和特性与土壤提供的服务之间的联系. 为保证指标体系的合理完整性,评估指标的选择遵循以下原则^[15]. 系统性原则:评估指标之间逻辑关系强、联系紧密,协同反映评价系统的完整性;科学性原则:评估指标的选择以科学理论为基础,每个指标应含义明确、能客观真实地反映评估对象意义;可操作性原则:评估指标有统一的计算量度和方法,数据易获取并便于定量处理.

1.2 指标的选取方法 利用权威的中英文文献

数据库,系统检索对土壤生态系统服务评价有关理论、指标体系、评价方法以及地球关键带科学相关理论研究文献,进行查询、整理、筛选、分析,建立区域土壤生态系统服务评价的指标体系框架.

1.3 指标选取 Nie et al^[16]将地球关键带中大气、植被、土壤、地表水、地下水五大组成部分进行生态系统服务的分类,依次为空气、食物供给、气候调节、氧气供给、水调节、侵蚀控制、生物控制、固碳、过滤营养物质和污染物、储水及供水、水净化和废物处理、娱乐及旅游服务. Adhikari and Hartemink^[3]将土壤属性连接到生态系统服务,土壤属性包括土壤有机碳、土壤质地、土壤 pH、岩基深度、容重、阳离子交换量、土壤孔隙等. Guo et al^[17]利用地理信息系统(geography information system, GIS),建立了农业面源污染潜力指数(agricultural non-point potential index, APPI)方法,对在基础数据能完全获得的情况下确定面源污染的优先控制区有一定的参考价值. 本研究在其基础上扩充内涵,依托 GIS 平台,从食物供给、水质净化及储存、土壤保持、生物多样性维持、气候调节及文化美学多个土壤生态系统服务功能出发,将基于地球关键带科学的土壤生态系统服务评价分为不同指数,即植物指数(plant index, *PI*)、空气调节指数(air regulation index, *ARI*)、土壤质量指数(soil quality index, *SQI*)、径流指数(runoff index, *RI*)、地下水补给指数(groundwater supply index, *GSI*)以及文化美学指数(cultural and aesthetic index, *CAI*),组成土壤生态系统服务评估的框架体系,依据与土壤服务功能发生耦合作用的植物相关指标、地表水相关指标、地下水相关指标以及土壤属性指标之间的模糊关系,建立隶属函数,即单因素评价模型. 将指标无量纲转换,用于计算获得各个指数值,同时结合研究区域的生态系统服务的功能分区,赋予权重,从而建立基于地球关键带土壤生态系统服务评价综合指数系统(integrated index of soil ecosystem service assessment based on Critical Zone Science, IIESA-CZ),继而将土壤自然资本与土壤生态系统服务建立联系,对区域的土壤生态系统服务空间分布进行评估. 在构建的评价模型中,分为三级图层,一级图层为基于地球关键带科学的土壤生态系统综合评估

层,二级图层为多重服务评价指数层,三级图层为 指标个数较多,为便于理解,将其归类,详细内容土壤生态系统服务相关的指标空间层. 三级图层 见表1.

表1 地球关键带科学的土壤生态服务评价综合指数系统框架

Table 1 Framework of the integrated index system for the evaluation of soil ecosystem services in Earth's Critical Zone

一级图层	二级图层	三级图层指标类别	三级图层
地球关键带 科学土壤 生态系统 服务综合评估 (HIESA-CZ)	空气调节指数(ARI)	土壤有机碳库	土壤有机碳库(soil organic carbon pool, SOCP)
		植被	植被覆盖度(vegetation coverage, VC)
	植物指数(PI)	植物生物量	植物初级净生产力(net primary productivity, NPP)
		植物品质	植物品质(农产品品质)(plant quality, PQ)
	土壤质量指数(SQI)	微生物总量	微生物量氮(microbial biomass nitrogen, MBN)、 微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)
		微生物多样性	shannon 指数
		土壤质地	土壤砂砾(sand)、黏粒(clay)、粉粒(silt)
		营养水平	全氮(TN _{soil})、全磷(TP _{soil})、全钾(TK)、碱解氮(HN _{soil})、有效磷(AP)
		土壤化学指标	pH、阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC)、 土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)
		土壤物理指标	容重(bulk density, BD)、田间含水量(field capacity, FC)、 土壤孔隙(porosity)、水稳定性团聚体(water-stable aggregates, AGG)
		土壤污染物含量	土壤污染物含量(HM _{soil})
	径流指数(RI)	地表径流	径流系数(α_{sur})
		径流水质	径流水质(WQ _{sur})
	地下水补给指数(GSI)	地下水补给量	地下水补给量(R _{gw})
		地下水水质	地下水水质(WQ _g)
	文化美学指数(CAI)	景观多样性	人口密度(population density, PD)、 人文景观密度(cultural attractions density, CAD)

1.4 指标处理方法 土壤生态系统服务指标体系的评价因素是基于前人对于土壤性质与土壤功能之间的模糊关系,建立隶属函数进行评估^[18-19],并加以扩展.参考林耀奔等^[20]将微生物群落相关指标与土壤性质经隶属函数转换,获得指标标准化数值,从而对土壤生态质量进行综合评估的方法,本研究将与土壤服务功能相关的植物相关指标、地表水相关指标以及地下水相关指标与土壤性质共同使用,建立隶属函数,对土壤服务功能进行映射,对指标进行评价,建立单因素评价模型.单因素评价模型中各个指标设置阈值,阈值的依据是结合研究区域特征和前人研究结果,同时结合数据分析和国家环境质量标准,将指标体系无量纲化,建立其评价模型,用于后续指数的计算.

隶属函数分为S型函数、反S型函数以及抛物线函数.S型函数表示土壤属性与土壤功能正相关,表示“越多越好”;反S型函数则与土壤功能负相关,表示“越少越好”^[18];抛物线函数是指土壤属性对土壤功能有最佳范围,也称为目标最优函数,土壤属性在此范围最优.S型函数包括土壤总氮、总磷、有机碳含量、阳离子交换量、水稳定团聚体、土壤微生物量碳、土壤微生物量氮、shannon指数、chao1指数等,pH、土壤容重、土壤质地属于抛物线函数,碳酸钙含量则属于反S型函数^[19-22].

S型函数公式如下^[21]:

$$S(x) = \begin{cases} 1 & x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a} & b < x < a \\ 0 & x \leq a \end{cases}$$

函数公式中 x 为实测指标值, a 和 b 分别是下阈值

和上阈值。

反 S 型函数公式中, x 为实测指标值, a 和 b 分别表示指标阈值的上限和下限:

$$IS(x) = \begin{cases} 1 & x \leq b \\ \frac{x-a}{b-a} & b < x < a \\ 0 & x > a \end{cases}$$

抛物线型函数公式中, x 为实测指标值, a_1, a_2 分别表示指标临界值的下限和上限; b_1, b_2 为最优值的上下界点:

$$PF(x) = \begin{cases} 1 & b_2 \geq x \geq b_1 \\ \frac{x-a_1}{b_1-a_1} & a_1 < x < b_1 \\ 0 & x \leq a_1 \text{ 或 } x \geq a_2 \end{cases}$$

2 评估加权模型的建立

2.1 评估加权模型 本文以地球关键带科学为框架, 建立综合加权评价模型, 选取土壤质量指数 (SQI)、空气调节指数 (ARI)、植物指数 (PI)、径流指数 (RI)、地下水补给指数 (GSI)、文化美学指数 (CAI) 作为二级指数, 如图 1 所示^[23]。

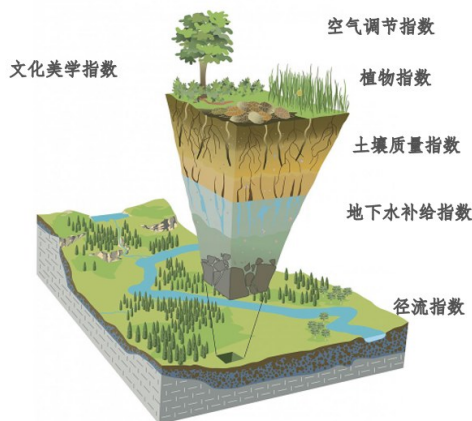


图 1 地球关键带科学的土壤生态服务评价综合指数系统示意图^[23]

Fig. 1 Schematic diagram of the integrated index system assessment of soil ecosystem services in Earth's Critical Zone^[23]

指数层综合建模公式如下:

$$IISASA-CZ = \begin{aligned} & SQI \times WF_1 + PI \times WF_2 + ARI \times WF_3 + (1) \\ & GSI \times WF_4 + RI \times WF_5 + CAI \times WF_6 \end{aligned}$$

$WF_1, WF_2, WF_3, WF_4, WF_5, WF_6$ 分别为六

个指数的权重。权重的确定是对该指标体系中的指标进行贡献率的评估。权重确定一般方法为层次分析法, 如庄惠钧^[24]选用了供给服务、调节服务、支持服务和文化服务内的九项评价指标, 利用层次分析法和生态系统服务价值的计算方法, 建立了生态系统服务价值评估模型; 董金茂和崔一民^[25]构建森林健康的三大类 15 个指标, 建立上、下层两两判断矩阵, 通过熵值法和层次分析法对评价指标体系进行权重计算; 马行天和曹涵^[26]根据城市生态系统健康的内涵, 选取活力、组织力、恢复力、生态系统服务功能和人类健康状况, 采用层次分析法确定指标权重, 构建了健康评价指标体系。专家打分法也是常用的权重确定方法^[27], 如柯新利等^[28]采用专家打分法确定武汉市耕地景观的游憩服务权重。生态系统服务评价重点关注的是对人的服务, 物质方面可以依据客观数据进行评价, 但非物质方面则带有主观色彩。因此, 对于权重的确定可以结合客观和主观的方面进行综合考虑。本研究中, 指标体系的权重确定分两步: 第一步, 三级图层中的指标权重采用均值的方式获得二级图层中的六个分指数; 第二步, 六个分指数经专家打分法确定各自权重。权重确定后, 可以进行土壤生态系统综合服务评价指数计算, 范围为 0~1。值越接近 1 说明土壤生态系统的综合服务越高, 土壤生态系统功能发挥越好, 越有利于可持续性发展。越接近 0 则说明土壤生态系统的综合服务越低, 据此可识别出区域内土壤生态系统服务功能脆弱地区。地球关键带以土壤圈为核心, 与大气圈、生物圈、水圈以及人类活动的交互作用密切, 本指数系统综合考虑上述要素, 对区域土壤生态系统服务进行综合量化评估, 有利于全面了解该区域生态系统服务的现状。

2.2 分项指数

2.2.1 SQI SQI 包含生物和非生物两类。微生物指标、土壤质地、营养水平、土壤化学指标、土壤物理指标、土壤污染指标 (如重金属、农药等污染物) 构成 SQI, 也是关键带土壤生态系统服务功能的核心成分。土壤是微生物重要的栖息地^[29], 土壤生态系统服务也依赖微生物发挥作用^[30]。如 Cameron et al^[31]和 Delgado-Baquerizo et al^[32]研究发现微生物多样性影响土壤功能发挥。微生物评价指标中多采用微生

物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)和shannon指数^[20,33]. 基于土壤污染的普遍性^[34-35],本研究将土壤污染纳入评价体系,建立土壤污染物含量综合加权指标 HM_{soil} . 关于常规的土壤质量的评估已有许多文献报道^[19-21],基于前人研究基础,选取土壤全氮(TN_{soil})、全磷(TP_{soil})、有机碳含量(SOC)、阳离子交换量(CEC)、碱解氮(HN)、有效磷(AP)、田间持水量(FC)、总孔隙(porosity)、水稳定团聚体(AGG)、pH、土壤容重(BD)、砂砾(sand)、黏粒(clay)和粉粒(silt)为SQI建立的重要指标.

常规土壤质量指标可以通过数据共享平台获

取,如中国土壤数据库、Soilgrids、世界土壤数据库(HWSD)、土壤和地形数字数据库(SOTER)以及土壤资源信息系统(ASRIS)等,土壤污染指标和微生物指标要通过布点采样分析获得相关数据. SQI采用均值的方法进行计算,公式如下:

$$SQI = \frac{1}{19} \left(PF_{clay} + PF_{silt} + PF_{TP_{soil}} + S_{TP_{soil}} + S_{AP} + S_{HN} + PF_{pH} + S_{CEC} + S_{SOC} + PF_{BD} + S_{FC} + S_{TK} + S_{MBC} + S_{MBN} + S_{shannon} + S_{porosity} + S_{AGG} + IS_{HM_{soil}} \right) \quad (2)$$

其中,SQI是土壤质量指数,为便于理解,将公式注释以表2展示.

表2 土壤质量指数公式注释
Table 2 Annotation of soil quality index formula

指标实测值数据集	指标数据集对应名称	单因素转换类型	单因素转换类型注解
TN_{soil}	全氮	$S_{TN_{soil}}$	指标实测值数据集经S型函数转换后的无量纲数据集
TP_{soil}	全磷	$S_{TP_{soil}}$	
AP	有效磷	S_{AP}	
HN	碱解氮	S_{HN}	
SOC	土壤有机质	S_{SOC}	
CEC	阳离子交换量	S_{CEC}	
FC	田间持水量	S_{FC}	
Porosity	总孔隙度	$S_{porosity}$	
AGG	水稳定性团聚体	S_{AGG}	指标实测值数据集经抛物线函数转换后的无量纲数据集
pH	pH	PF_{pH}	
BD	容重	PF_{BD}	
Sand	砂砾	PF_{sand}	
Clay	粉粒	PF_{clay}	
Silt	黏粒	PF_{silt}	
MBC	微生物量碳	S_{MBC}	指标实测值数据集经S型函数后的无量纲数据集
MBN	微生物量氮	S_{MBN}	
Shannon	微生物shannon指数	$S_{shannon}$	
TK	总钾	S_{TK}	总钾是S型函数
HM_{soil}	土壤污染物含量综合加权值	$IS_{HM_{soil}}$	指标实测值经反S型函数转换的无量纲数据集

2.2.2 ARI 土壤生态系统中植被扮演很重要的角色^[36],通常用植被覆盖度来表征植被状况. 植被覆盖度(vegetation coverage, VC)指单位面积内植被冠层垂直投影的百分比^[37]. 有研究表明提高植被覆盖度与土壤抗蚀效应具有正面作用^[38],提高植被覆盖度还可以抑尘从而净化空气^[39-41],因此将植被覆盖度作为ARI指标之一. 植被覆盖度越大,说明植被生长状况越好,覆盖面

积越广,对大气调节功能越好. 土壤作为全球陆地生态系统最大的碳汇,土壤碳库的变化对气候变化具有重要的调节作用^[13,42]. 土壤中有有机碳含量越高,对减缓气候变化越有利,土壤有机碳储存(soil organic carbon pool, SOCP)与土壤气候调节功能呈正相关关系.

植被覆盖度指标可以采取地面调查法和遥感监测法^[43]. 土壤有机碳储存可以从数据共享平

台,如 soilgrids(<https://soilgrids.org/>)获得. ARI 可通过植被覆盖度与土壤有机碳储存来计算. 由于两者具有不同作用,所以将其权重设为相等.

$$ARI = \frac{1}{2}(S_{VC} + S_{SOCP}) \quad (3)$$

其中, ARI 为空气调节指数, VC 为植被覆盖度实测值的空间数据集, $SOCP$ 为土壤有机碳库实测值的空间数据集, S_{VC} , S_{SOCP} 分别为植被覆盖度、土壤有机碳库经 S 型函数转换后的无量纲数据集.

2.2.3 PI 植物初级净生产力(net primary productivity, NPP)及品质(plant quality, PQ)指标构成植物指数(PI),植物初级净生产力属于土壤生态系统服务的供给服务和支持服务,即土壤为人和动物所需植物的生长提供水分、养分和物理支持. 植物初级净生产力可以采用遥感法获得^[44],植物品质则可以采用布点采样分析法、遥感技术进行测定^[45-46]. 植物初级净生产力与土壤服务功能呈正相关关系,适用 S 型函数进行指标转换,植物品质若以重金属等有害物质作为指标,则与土壤服务功能呈负相关,则采用反 S 型函数,若采用蛋白质、氮等营养元素,则采用 S 型函数进行转换,根据研究区不同的服务功能进行指标的选定,如农田系统,作物品质可以选择较为关注的粮食中重金属含量. 土壤生态系统为人类提供服务,如产量为供给服务,依据土壤属性具有的多重功能,各自发挥作用,用以表达土壤不同服务功能的作用,所以将各个指标的权重设为一致, PI 的公式如下所示:

$$PI = \frac{1}{2}(S_{NPP} + S_{PQ}) \quad (4)$$

其中, PI 为植物指数, NPP 为植物初级净生产力的空间数据集, PQ 为植物品质实测值的空间分布数据集. S_{NPP} 是植物初级净生产力实测值经 S 型函数转化后的无量纲化数据集, S_{PQ} 为植物品质实测值经反 S 型函数转换后无量纲化数据集.

2.2.4 RI 土壤可通过地表径流对地表水水质产生影响^[47],本系统中用 RI 来表征. RI 包含径流系数(α_{sur})(径流深度与降雨量的比值)、径流水质(WQ_{sur}). 径流深度可以从水文站获取,或根据模型进行计算,如 SWAT^[48]等水文模型,或实地监测获得,降雨量可以从中国气象数据网(<https://data.cma.cn>)获取;径流水质可以通过实地采样

获得,也可以通过模型计算,如 SWAT^[49]、输出系数模型^[50]等. 在农田生态系统,地表径流是产生农业面源污染的重要因素^[51],土壤调节功能越大,径流量少、径流水质越好—元素流失越少,故将这两项指标作为反 S 型函数考虑. 经过与土壤功能的相关性确定后,则进行指标转换,取均值获得 RI ,计算公式如下:

$$RI = \frac{1}{n}(IS_{WQ_1} + IS_{WQ_2} + \dots + IS_{WQ_{n-1}} + IS_{\alpha_{sur}}) \quad (5)$$

其中, RI 是径流指数, $WQ_1, WQ_2, \dots, WQ_{n-1}, \alpha_{sur}$ 分别为地表水质指标以及径流系数实测值的指标空间数据集. $IS_{WQ}, IS_{\alpha_{sur}}$ 分别为地表水质指标以及径流系数实测值经反 S 型函数转换后的无量纲数据集.

2.2.5 GSI 地下水对生态系统服务具有实际支持作用^[52], GSI 包括地下水补给量(R_{gw})、地下水水质(WQ_g). 地下水补给量指标,可以通过模型计算,如 Hydrus 模拟^[53],也可以用实验方法,如放射性同位素法^[54],地下水补给是对淡水资源的存储,所以将地下水补给量归为 S 型函数,地下水水质与土壤调节功能发挥大小呈反比,所以将其作为反 S 型函数考虑. 将指标转换计算获得 GSI ,计算公式如下:

$$GSI = \frac{1}{n}(IS_{WQ_{g1}} + IS_{WQ_{g2}} + \dots + IS_{WQ_{gn-1}} + S_{R_{gw}}) \quad (6)$$

其中, GSI 是地下水补给指数, WQ_g, R_{gw} 分别为地下水水质、补给量指标实测值的空间数据集. IS_{WQ_g} 为地下水水质经反 S 型函数转换后的无量纲数据集. $S_{R_{gw}}$ 为地下水补给量实测值经 S 型函数转换后的无量纲数据集.

2.2.6 CAI 土壤生态系统文化服务是满足人们在自然环境中的精神享受. 随着社会进步,文化服务越来越受重视. 有学者采用专家打分法和指标评价法、空间分布评价体系^[28]、旅行成本法^[55-56]、调查问卷偏好及支付意愿^[57]等方法基于景观的旅游价值进行文化服务评价指标体系的建立. 本研究在其基础上提出 CAI 指标体系,以人口密度(population density, PD)和人文景观密度(cultural attractions density, CAD)^[16]作为指标,人口密度的大小反映土壤生态系统文化服务发挥作用的潜力大小,人口密度越大,游憩价值发挥越

大,即空间上的可达性越大,其发挥的作用越大。人文景观密度代表了能够提供生态系统文化服务的基础,其内涵是土壤生态系统的供应潜力,包含风景区、湖泊、公园、自然保护区、文化遗址、学校单位。人口密度可以从数据平台获得,如地理国情监测云平台。通过对网络地图的地图信息点(point of interest, POI)数据进行爬虫与模糊搜索得到人文景观空间点位信息,利用核密度分析方法进行统计人文景观数点要素的空间密度分布,计算得到人文景观密度数据。人口密度和人文景观密度与文化服务呈正相关,因此两者皆适用于S型函数。

$$CAI = \frac{1}{2}(S_{PD} + S_{CAD}) \quad (7)$$

其中,CAI是文化美学指数,PD和CAD分别为CAI中人口密度和人文景观密度指标实测值的空间数据集。 S_{PD} 和 S_{CAD} 为人口密度和人文景观密度实测值经S型函数转换后的无量纲数据集。

2.2.7 小结 将上述各个指标经单因素评价模型进行归一化、均值化获得各分项指数,各项分指数值的范围为0~1,指数值的大小表示该区域中土壤生态系统中各因素(大气、植物、地下水、地表水以及文化美学)的服务状态,数值越大,说明该指数类型土壤服务功能越好,反之则越差。在地球关键带系统中,强调关键带系统为人类提供的各类服务,生态系统服务功能的评价也是以人为核心,可采用问卷调查、专家打分法确定各分项指数的权重,然后计算获得综合指数,可视化获得区域土壤生态系统服务分布图,整体展示区域土壤生态系统服务状态。

3 讨论

对于土壤的评价,之前多以土壤质地、pH、营养元素等土壤固有属性进行土壤质量评价^[58-61]。近几年,土壤生态系统服务研究发展很快,但基本以传统的地理学为基础,大多考虑生态系统服务的平面流动;另一方面,土壤生态系统服务的空间差异性缺乏研究^[62],这易导致“一刀切”管理模式,不能对土壤健康进行精准监管,因此,评价指标体系仍需时在时空上扩展探索^[63]。选择评价的指标体系以服务类别为直接评价对象,忽略了土壤

自身,未权衡社会和自然属性^[64-65]。本研究利用文献整理法、单因素评价模型以及GIS空间分析等方法,尝试将土壤自然资本、土壤功能和土壤提供的服务等概念联系起来,立体量化土壤生态系统服务,突破传统土壤生态系统服务评价边界,系统评价土壤生态系统服务及其空间变异性。基于土壤属性的土壤功能表现,量化评估土壤的六种生态系统服务,包括食物供给、水质净化及水储存、土壤保持、生物多样性、气候调节及文化美学,并以数字化地图的形式展示区域生态系统服务综合指数值,为管理决策者传达土壤生态服务功能的空间变异性,促进土壤生态系统的健康管理。本研究只是提出了评价的框架模型和思路,对于各指数中指标的选取及其量化计算还有待进一步的细化。

4 结论

随着社会经济快速发展,资源、环境和生态问题叠加耦合,急需多学科交叉、多领域融合的新系统研究来提高生态系统服务的可持续性。地球关键带将与人类密切相关的近地表作为独立的开放系统,为解决这种需求提供了一个完整的系统框架^[66]。本研究尝试建立了从地球关键带角度评估土壤生态系统的食物供给、水质净化及水储存、土壤保持、生物多样性、气候调节及文化美学多重服务的指标体系,以及土壤生态系统服务功能的评价方法。研究结果及其应用对于评价和指导“山水林田湖草”生命共同体建设和土壤生态修复与功能提升具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] Robinson D A, Hockley N, Dominati E, et al. Natural capital, ecosystem services, and soil change: Why soil science must embrace an ecosystems approach. *Vadose Zone Journal*, 2012, DOI:10.2136/vzj2011.0051.
- [2] Jónsson J G, Davíðsdóttir B, Nikolaidis N P. Valuation of soil ecosystem services. *Advances in Agronomy*, 2017(142):353-384.
- [3] Adhikari K, Hartemink A E. Linking soils to ecosystem services: Global review. *Geoderma*, 2016 (262):101-111.

- [4] Jónsson J G, Davíðsdóttir B. Classification and valuation of soil ecosystem services. *Agricultural Systems*, 2016 (145): 24—38.
- [5] Dominati E, Mackay A, Green S, et al. A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems: A case study of pastoral agriculture in New Zealand. *Ecological Economics*, 2014 (100): 119—129.
- [6] 段丽君. 耕地地区土壤生态系统服务评价方法研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学, 2019. (Duan L J. Study on the evaluation method of soil ecosystem services in cultivated land. Master Dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.)
- [7] Sandhu H S, Wratten S D, Cullen R, et al. The future of farming: The value of ecosystem services in conventional and organic arable land. An experimental approach. *Ecological Economics*, 2008, 64 (4): 835—848.
- [8] 盛婧, 陈留根, 朱普平. 稻麦轮作农田生态系统服务功能价值评估. *中国生态农业学报*, 2008, 16(6): 1541—1545. (Sheng J, Chen L G, Zhu P P. Evaluation of ecological service value of rice-wheat rotation ecosystem. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16 (6): 1541—1545.)
- [9] Anderson S J, Ankor B L, Sutton P C. Ecosystem service valuations of South Africa using a variety of land cover data sources and resolutions. *Ecosystem Services*, 2017 (27): 173—178.
- [10] Greiner L, Nussbaum M, Papritz A, et al. Assessment of soil multi-functionality to support the sustainable use of soil resources on the Swiss Plateau. *Geoderma Regional*, 2018, DOI: 10.1016/j.geodrs.2018.e00181.
- [11] Calzolari C, Ungaro F, Filippi N, et al. A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale. *Geoderma*, 2016 (261): 190—203.
- [12] National Research Council, Committee on Geosciences, Environment, and Resources, Board on Earth Sciences and Resources. Basic research opportunities in earth science. Washington D.C. USA: National Academies Press, 2000, 168.
- [13] 朱永官, 李刚, 张甘霖等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务. *地理学报*, 2015, 7(12): 1859—1869. (Zhu Y G, Li G, Zhang G L, et al. Soil security: From Earth's Critical Zone to ecosystem services. *Acta geographica Sinica*, 2015, 7 (12): 1859—1869.)
- [14] 韩永伟, 高馨婷, 高吉喜等. 重要生态功能区典型生态服务及其评估指标体系的构建. *生态环境学报*, 2010, 19(12): 2986—2992. (Han Y W, Gao X T, Gao J X, et al. Typical ecosystem services and evaluation indicator system of significant eco-function areas. *Ecology and environmental sciences*, 2010, 19 (12): 2986—2992.)
- [15] 刘伟峰, 刘大海, 邢文秀等. 海洋环境污染损害中直接损失的识别及评估指标体系的构建. *海洋环境科学*, 2019, 38(1): 120—128. (Liu W F, Liu D H, Xing W X, et al. Identification of direct loss in marine environmental pollution damage and construction of evaluation index system. *Marine environmental science*, 2019, 38 (1): 120—128.)
- [16] Nie W, Guo H, Yang L, et al. Economic valuation of Earth's Critical Zone: A pilot study of the Zhangxi catchment, China. *Sustainability*, 2020, 12 (4): 1699.
- [17] Guo H Y, Wang X R, Zhu J G. Quantification and index of non-point source pollution in Taihu Lake region with GIS. *Environmental geochemistry and health*, 2004, 26 (2): 147—156.
- [18] Liebig M A, Varvel G, Doran J. A simple performance-based index for assessing multiple agroecosystem functions. *Agronomy Journal*, 2001, 93 (2): 313—318.
- [19] 乔云发, 钟鑫, 苗淑杰等. 基于最小数据集的东北风沙土农田耕层土壤质量评价指标. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 132—138. (Qiao Y F, Zhong X, Miao S J, et al. Evaluation index of soil quality in northeast China based on minimum data set. *Research of soil and water conservation*, 2019, 26 (4): 132—138.)
- [20] 林耀奔, 叶艳妹, 吴次芳等. 基于微生物视角的耕地土壤质量综合评价: 以 A 县土地整治区为例. *中国土地科学*, 2019, 33(6): 96—103. (Lin Y B, Ye Y M, Wu C F, et al. Comprehensive evaluation on cultivated land soil quality from the perspective of microorganism: A case study of a county. *China land sciences*, 2019, 33 (6): 96—103.)
- [21] 许明祥. 黄土丘陵区生态恢复过程中土壤质量演变及调控. 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003. (Xu M X. Soil quality evolvement in the process of ecosystem restoration and its management in loess hilly-gully region. Ph.D. Dissertation. Yangling: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2003.)
- [22] 丁能飞, 林义成, 杨丽等. 苍南县稻田土壤稻米质量安全性评价研究. *安徽农业科学*, 2007, 35(4): 1068—1069. (Ding N F, Lin Y C, Yang L, et al.

- Study on quality and safety evaluation of paddy soil and rice in Cangnan county. *Anhui Agricultural Science*, 2007, 35 (4): 1068—1069.)
- [23] Chorover J, Kretschmar R, Garcia-Pichel F, et al. Soil biogeochemical processes within the Critical Zone. *GeoScience World*, 2007, 3 (5), 321—326.
- [24] 庄惠钧. 基于层次分析法的生态系统服务价值评估:以苏州湿地为例. *农村经济与科技*, 2020, 31(1): 49—50. (Zhuang H J. Evaluation of ecosystem service value based on analytic hierarchy process: A case study of Suzhou wetland. *Rural Economy and Science-Technology*, 2020, 31 (1): 49—50.)
- [25] 董金茂, 崔一民. 基于层次分析法的森林健康状况评价研究. *林业调查规划*, 2020, 45(1): 15—18. (Dong J M, Cui Y M. Research on the forest health evaluation based on AHP method. *Forestry survey planning*, 2020, 45 (1): 15—18.)
- [26] 马行天, 曹涵. 基于层次分析法的陕西省城市生态系统健康动态评价. *四川环境*, 2019, 38(3): 150—158. (Ma X T, Cao H. Assessment of urban ecosystem health in Shaanxi province based on analytic hierarchy process. *Sichuan environment*, 2019, 38 (3): 150—158.)
- [27] 王亚芳. 生态系统服务及其价值评估研究进展. *环境与发展*, 2019, 31(7): 1—3. (Wang Y F. Research progress on ecosystem services and their value assessment. *Environment and development*, 2019, 31 (7): 1—3.)
- [28] 柯新利, 李红艳, 刘荣霞. 武汉市耕地景观游憩功能与可达性的空间匹配格局. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(5): 751—760. (Ke X L, Li H Y, Liu R X. Research on the spatial matching pattern of recreational accessibility of cultivated land landscape function and accessibility in Wuhan. *Resources and environment of Yangtze River Basin*, 2016, 25 (5): 751—760.)
- [29] Dolfing J, Vos A, Bloem J, et al. Microbial diversity in archived soils. *Science*, 2004, 306: 813.
- [30] Maes J, Lique C, Teller A, et al. An indicator framework for assessing ecosystem services in support of the EU Biodiversity Strategy to 2020. *Ecosystem Services*, 2016 (17): 14—23.
- [31] Cameron W, Franz B S, Franco W, et al. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111 (14): 5266—5270.
- [32] Delgado-Baquerizo M, Reich P B, Khachane A N, et al. It is elemental: Soil nutrient stoichiometry drives bacterial diversity. *Environmental Microbiology*, 2016, 19 (3): 1176.
- [33] 吴建军, 蒋艳梅, 吴愉萍等. 重金属复合污染对水稻土壤微生物生物量和群落结构的影响. *土壤学报*, 2008, 45 (6): 1102—1109. (Wu J J, Jiang Y Y, Wu Y P, et al. Effects of heavy metal compound pollution on microbial biomass and community structure in paddy soil effects of complex heavy metal pollution on biomass and community structure of soil microbes in paddy soil. *Journal of Soil Science*, 2008, 45 (6): 1102—1109.)
- [34] 雷冰鸣. 孝义市工矿区农田土壤质量状况及潜在生态风险评价. 硕士学位论文. 晋中: 山西农业大学, 2018. (Lei B M. The quality of farmland soil in Xiaoyi mining area and potential ecological risk assessment. Master Dissertation. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2018.)
- [35] Utete B, Fregene B T. Assessing the spatial and temporal variability and related environmental risks of toxic metals in Lake Asejire, south-western Nigeria. *Scientific African*, 2019, DOI: 10.1016/j.sciaf. 2019.e00259.
- [36] 袁沫汐, 邹玲, 林爱文等. 湖北省地区植被覆盖变化及其对气候因子的响应. *生态学报*, 2016, 36(17): 5315—5323. (Yuan M X, Zou L, Lin A W. Analyzing dynamic vegetation change and response to climatic factors in Hubei Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (17): 5315—5323.)
- [37] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80 (1): 76—87.
- [38] 黄麟, 曹巍, 祝萍. 退耕还林还草工程生态效应的地域分异特征. *生态学报*, 2020(12): 1—12. (Huang L, Cao W, Zhu P. The regional variation characters of ecological effects of the grain for green project. *Journal of Ecology*, 2020 (12): 1—12.)
- [39] 金华. 植物叶片滞尘与其C/N/P生态化学计量学关系研究. 硕士学位论文, 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015. (Jin H. The study on the relationships of plant leaf's dust retention and its C/N/P ecological stoichiometry. Master Dissertation. Urumqi: Xinjiang University, 2015.)
- [40] 王丽君. 唐山市主要园林植物滞尘能力研究. *安徽农业科学*, 2020, 48(2): 135—138. (Wang L J. Dust absorption capacities of main garden plant species in

- Tangshan city. *Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48 (2): 135—138.)
- [41] 李果. 浙江农林大学衣锦校区绿化植物滞尘效应分析. 硕士学位论文, 杭州: 浙江农林大学, 2019. (Li G. Analysis on dust retention effect of greening plants in Yijin campus of Zhejiang Agriculture and Forestry University. Master Dissertation. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2019.)
- [42] Dominati E, Patterson M, Mackay A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 2010, 69 (9): 1858—1868.
- [43] 何宝忠, 丁建丽, 张喆等. 新疆植被覆盖度趋势演变实验性分析. *地理学报*, 2016, 71(11): 1948—1966. (He B Z, Ding J L, Zhang Z, et al. Experimental analysis of spatial and temporal dynamics of fractional vegetation cover in Xinjiang. *Journal of Geography*, 2016, 71 (11): 1948—1966.)
- [44] 何昭霞, 杨存建, 倪静等. 亚热带森林植被生物量与遥感地学数据之间的相关性分析//2011 年智能信息技术应用学会年会论文集. 马累, 马尔代夫: 美国应用科学研究所, 2011: 346—349.
- [45] 张成业. 铜胁迫下的植被高光谱特性与遥感信息提取研究. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(1): 143. (Zhang C Y. Hyperspectral characteristics and remote sensing information extraction of vegetation under copper stress. *Geography and Geographic Information Science*, 2020, 36 (1): 143.)
- [46] 张超, 杨可明, 王敏等. 玉米铜污染实时动态监测的高光谱分形维数模型. *江苏农业科学*, 2019, 47(18): 260—265. (Zhang C, Yang K M, Wang M, et al. Hyperspectral fractal dimension model for real-time monitoring of copper pollution in maize. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(18): 260—265.)
- [47] 王琦, 魏来, 韩煜等. 查干湖汇水区面源污染风险识别及管控. *环境科学研究*, 2020, 33(9): 2074—2083. (Wang Q, Wei L, Han Y, et al. Risk identification and control of non-point sources pollution in Chagan Lake catchment area. *Environmental Science Research*: 2020, 33 (9): 2074—2083.)
- [48] 许自舟, 周旭东, 隋伟娜等. 基于 SWAT 模型的碧流河流域入海径流模拟研究. *海洋环境科学*, 2020, 39(2): 216—222. (Xu Z Z, Zhou X D, S W N. et al. Simulation of runoff from the Biliu river basin based on SWAT model. *Marine Environmental Science*, 2020, 39 (2): 216—222.)
- [49] 陈铁, 孙飞云, 杨淑芳等. 基于 SWAT 模型的观澜河流域城市面源污染负荷量化及影响效应评估. *环境工程学报*, 2020, 14(10): 2866—2875. (Chen T, Sun F Y, Yang S F, et al. Load quantification and effect evaluation of urban non-point source pollution in the Guanlan river basin based on SWAT model. *Journal of Environmental Engineering*: 2020, 14 (10): 2866—2875.)
- [50] 韦晓雪, 李晓琳, 郑毅. 基于输出系数模型的 1998—2016 年洱海流域磷素时空变化特征分析. *农业环境科学学报*, 2020, 39(1): 171—181. (Wei X X, Li X L, Zheng Y. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of phosphorus in Erhai Lake basin from 1998 to 2016 based on export coefficient model. *Journal of Agricultural Environmental Science*, 2020, 39 (1): 171—181.)
- [51] 章卫, 石先罗, 胡红亮等. 基于小流域农业面源污染氮磷负荷评价方法的研究. *江西科学*, 2016, 34(3): 328—331, 378. (Zhang W, Shi X L, Hu H L, et al. Study on evaluation methods of non-point source pollution in small watershed based on nitrogen and phosphorus load. *Jiangxi Science*, 2016, 34 (3): 328—331, 378.)
- [52] Pinke Z, Decsi B, Kozma Z, et al. A spatially explicit analysis of wheat and maize yield sensitivity to changing groundwater levels in Hungary, 1961—2010. *Science of the Total Environment*, 2020, 715.
- [53] 刘明明. 伊犁河谷区灌溉条件下包气带水分运移规律及地下水补给研究. 硕士学位论文. 西安: 长安大学, 2019. (Liu M M. Moisture movement law and groundwater recharge in aeration zone under irrigation conditions in Yili River Valley. Master Dissertation. Xi'an: Chang'an University, 2019.)
- [54] 王希龙, 杜金洲, 张经. 基于 $\sim(223)$ Ra 和 $\sim(224)$ Ra 的桑沟湾海底地下水排放通量. *海洋学报*, 2017, 39 (4): 16—27. (Wang X L, Du J Z, Zhang J. Discharge fluxes of submarine groundwater in Sanggou Bay based on $\sim(223)$ Ra and $\sim(224)$ Ra. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39 (4): 16—27.)
- [55] Cameron T A, Shaw W D, Ragland S E, et al. Using actual and contingent behavior data with differing levels of time aggregation to model recreation demand. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 1996, 21 (1): 130—149.
- [56] 王喜刚, 王尔大. 基于修正旅行成本法的景区游憩价值评估模型: 大连老虎滩海洋公园的实证分析.

- 资源科学, 2013, 35(8): 1693—1700. (Wang X G, Wang E D. Assessment of the recreation value of a tourism area based on the revised cost method: An empirical analysis of Dalian Tiger Beach Marine Park. *Resource Science*, 2013, 35 (8): 1693—1700.)
- [57] Berkel D B V, Verburg P H. Spatial quantification and valuation of cultural ecosystem services in an agricultural landscape. *Ecological Indicators*, 2014 (37): 163—174.
- [58] Andrews S S, Flora C B, Mitchell J P, et al. Growers' perceptions and acceptance of soil quality indices. *Geoderma*, 2003, 114 (3): 187—213.
- [59] Kongor J E, Boeckx P, Vermeir P, et al. Assessment of soil fertility and quality for improved cocoa production in six cocoa growing regions in Ghana. *Agroforestry Systems*, 2019, 93 (4): 1455—1467.
- [60] 王玉军, 刘存, 周东美等. 一种农田土壤重金属影响评价的新方法: 土壤和农产品综合质量指数法. *农业环境科学学报*, 2016, 35(7): 1225—1232. (Wang Y J, Liu C, Zhou D M, et al. A new approach for evaluating soil heavy metal impact: A comprehensive index combined soil and environmental quality and agricultural products. *Journal of Agro - Environmental Science*, 2016, 35 (7): 1225—1232.)
- [61] 史春鸿, 张笑蓉. 1:50000高炉集幅土壤质量地球化学调查评价成果. *西部探矿工程*, 2019(7): 130—132. (Shi C H, Zhang X R. Geochemical investigation and evaluation results of soil quality in 1:50000 blast furnace cluster. *Western exploration project*, 2019 (7): 130—132.)
- [62] 孔凡靖, 陈玉成, 陈庆华等. 重庆市农田生态服务价值时空变化特征及其驱动因素分析. *中国生态农业学报*, 2019, 27(11): 1637—1648. (Kong F J, Chen Y C, Chen Q H, et al. Temporal and spatial variation and driving factors of farmland ecological service value in Chongqing. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2019, 27 (11): 1637—1648.)
- [63] 吴绍华, 虞燕娜, 朱江等. 土壤生态系统服务的概念、量化及其对城市化的响应. *土壤学报*, 2015, 52 (5): 970—978. (Wu S H, Yu Y N, Zhu J, et al. Soil ecosystem services: Concept and quantification and response to urbanization. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (5): 970—978.)
- [64] 尹剑慧, 卢欣石. 中国草原生态功能评价指标体系. *生态学报*, 2009(5): 2622—2630. (Yin J H, Lu X S. Construction of evaluation indicator system of China grassland ecological function. *Acta Ecologica Sinica*, 2009 (5): 2622—2630.)
- [65] Mononen L, Auvinen A P, Ahokumpu A L, et al. National ecosystem service indicators: Measures of social - ecological sustainability. *Ecological Indicators*, 2016 (61): 27—37.
- [66] 杨建锋, 张翠光. 地球关键带: 地质环境研究的新框架. *水文地质工程地质*, 2014, 41(3): 98—104, 110. (Yang J F, Zhang C G. Earth critical zone: A holistic framework geo-environment researches. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2014, 41 (3): 98—104, 110.)

(责任编辑 杨 贞)