

# 高寒草地植被与土壤水源涵养功能的时空耦合关系

张晓宁<sup>1,2</sup>, 李晓丹<sup>1,3</sup>, 刘星雨<sup>1</sup>, 年丽丽<sup>1,2</sup>, 杨莹博<sup>2</sup>, 刘学录<sup>2</sup>

(1.甘肃农业大学林学院,兰州 730070;2.甘肃农业大学资源与环境学院,  
兰州 730070;3.甘肃农业大学管理学院,兰州 730070)

**摘要:** 探究草地植被格局与土壤水源涵养功能的关系,对于评价和有效利用土壤及草地植被资源起着重要的作用。以黄河源区的高寒草地生态系统为研究对象,运用 MODIS 数据构建土壤水源涵养功能模型并探究其时空变化特征,明确草地植被的时空变化规律,以耦合协调度理论为基础探讨二者耦合关系的季节性变化和空间分布特征。结果表明:(1)2000—2021 年土壤水源涵养功能指数和综合植被指数在各个季节上均呈增加趋势,22 年的季平均值表现为夏季和秋季高于春季和冬季;(2)2000—2021 年各个季节土壤水源涵养功能—植被(SWCF—VEG)的耦合协调度基本上均呈增加趋势,同时各土层深度耦合协调度值的空间分布差异明显,且在季节上表现为夏季>秋季>春季>冬季;(3)2000—2021 年季节上各草地类型的 SWCF—VEG 耦合协调度均为增加趋势;各季节温性草原不同土层深度耦合协调度的平均值均最大,且夏季、秋季和冬季各草地类型的值均表现为 10—20 cm>0—10 cm;各草地类型不同季节的耦合协调度发展类型各异。研究结果为黄河源区草地植被与土壤水源涵养功能的耦合关系提供高效定量的时空分析方法,可为草地植被—土壤的可持续发展奠定基础。

**关键词:** 草地生态系统; 水源涵养; MODIS; 时空分异; 耦合关系

**中图分类号:** X171.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2023)05-0243-09

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.05.029

## Spatial and Temporal Coupling Relationship Between Alpine Grassland Vegetation and Soil Water Conservation Function

ZHANG Xiaoning<sup>1,2</sup>, LI Xiaodan<sup>1,3</sup>, LIU Xingyu<sup>1</sup>, NIAN Lili<sup>1,2</sup>, YANG Yingbo<sup>2</sup>, LIU Xuelu<sup>2</sup>

(1.College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 2.College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 3.College of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

**Abstract:** Exploring the relationship between grassland vegetation patterns and soil water conservation function plays an important role in evaluating and effectively utilizing soil and grassland vegetation resources. The study was conducted on the alpine grassland ecosystem in the Yellow River source area, a model of soil water conservation function was constructed using MODIS data and its spatial and temporal variation characteristics were explored. The spatial and temporal variation patterns of grassland vegetation were clarified, and the seasonal variation and spatial distribution characteristics of their coupling relationship were explored based on the theory of coupling coordination. The results showed that: (1) Soil water conservation function index and comprehensive vegetation index showed an increasing trend in all seasons from 2000 to 2021, and the seasonal average values were higher in summer and autumn than those in spring and winter. (2) The coupling coordination of soil water conservation function-vegetation (SWCF—VEG) basically showed an increasing trend in all seasons from 2000 to 2021, and the spatial distribution of the coupling coordination values were significantly varied among different soil layer depths, and the seasonal performance followed the order of summer>autumn>spring>winter. (3) The coupling coordination of SWCF—VEG showed an increasing trend for each grassland type in all seasons from 2000 to 2021. The mean values of coupling coordination for various soil depths in temperate grasslands were the maximum in all seasons, and

收稿日期: 2023-03-22

资助项目: 甘肃省教育厅创新创业教育教学改革研究项目(CXCYJG2022002); 甘肃省教育科学“十三五”规划 2020 年度一般课题项目(GS[2020]GHB4640); 甘肃省自然资源规划科研项目(GAU-XZ-20160812)

第一作者: 张晓宁(1995—), 女, 博士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: zxn893707607@163.com

通信作者: 刘学录(1966—), 男, 教授, 主要从事景观生态学和土地资源管理研究。E-mail: liuxl@gsau.edu.cn

the values of 10—20 cm were greater than those of 0—10 cm for each grassland type in summer, autumn and winter. The coupling coordination development types varied among grassland types in different seasons. The study could provide an efficient and quantitative spatiotemporal analysis method for the coupling relationship between grassland vegetation and soil water conservation function in the Yellow River source area, and the results could be the basis for the sustainable development of vegetation-soil in grassland.

**Keywords:** grassland ecosystem; water conservation; MODIS; spatial-temporal differentiation; coupling relationship

草地是陆地生态系统的重要组成部分<sup>[1]</sup>,草地生态系统提供给人类植物资源和畜牧产品的同时,还对维持生态服务和功能起到至关重要的作用,尤其是高寒和干旱等自然条件严酷的地区<sup>[2]</sup>,高寒草地是其重要的生态屏障,在水土保持、固碳和生物多样性等方面扮演着至关重要的角色<sup>[3]</sup>。此外,水源涵养功能在各项生态系统服务中处于中心地位,是其中重要的生态系统服务功能<sup>[4]</sup>。水源涵养功能的具体作用在于净化水质、拦蓄和维持降水、调节地表径流、抑制蒸发、供给淡水等,是水资源可持续的基础和保障<sup>[5]</sup>。黄河源区的水源涵养单元主要为冻土、冰川、草地、湿地等,其中草地通过土壤—植被的相互作用蓄存水分并发挥水源涵养功能,其面积分布最广,占主导地位<sup>[6]</sup>。因此,评估黄河源区高寒草地的土壤水源涵养功能对保障区域生态安全及实现水资源的可持续发展具有重要意义。

植物的生长改变其周围的土壤环境,同时这种环境也可能导致植物生理活性甚至植被组成的变化<sup>[7]</sup>。已有研究<sup>[8]</sup>表明,植物的建立及其演替过程可以导致土壤发育速率的明显变化,从而影响土壤水力特性和水量平衡,同时土壤发育程度通过土壤水分与养分可用性、土壤厚度、土壤微生物活性与类型可以控制植物群落的建立<sup>[9]</sup>。由此可知,土壤、植被和水在不同的时空尺度上存在耦合关系<sup>[10]</sup>。土壤层是生态系统水源涵养的主体,在蓄水保肥等方面发挥着至关重要的作用,土壤层水源涵养功能很大程度上受到容重、有机质含量、孔隙度和质地等理化性质的影响<sup>[11]</sup>。

耦合协调度可以有效地反映植被和土壤系统在生态恢复过程中的相互作用,对二者的耦合状态进行量化。同时,基于植被与土壤各自的特征属性,二者的耦合关系及其对外界干扰的响应亦存在差异<sup>[12]</sup>。目前为止,已有的关于土壤—植被耦合研究通常局限于传统观测手段的限制,具有固定的时空尺度,例如,徐明等<sup>[13]</sup>评价不同植被恢复模式沟谷地植被—土壤系统的耦合关系;王皓月等<sup>[14]</sup>评价九峰山不同林分类型生态恢复植被—土壤系统的耦合关系;彭晚霞等<sup>[15]</sup>从小尺度角度研究退耕还林还草模式下的植被土壤耦合协调状况;李豪等<sup>[16]</sup>与白一茹等<sup>[17]</sup>分别对

不同微地形和不同土地利用方式的植被—土壤系统耦合特征进行探究。然而,关于土壤水源涵养功能—植被在较长的时间尺度与较广的空间尺度的研究基本空白,但随着遥感技术的不断发展,其在土壤养分的空间分布反演<sup>[18]</sup>、水源涵养功能评价<sup>[19]</sup>以及植被生态质量评估<sup>[20]</sup>中均已被应用,可更好地为探究二者复杂的时空耦合关系提供基础。

基于上述背景,以位于黄河源头的甘南水源涵养区为研究区域,明确草地植被的时空变化规律,探究土壤水源涵养功能时空变化特征,探讨土壤水源涵养功能与草地植被的时空耦合关系,对监测当地乃至区域及全国草地生态系统的修复和保护具有重要意义,也能够为黄河源区的管理措施及可持续发展对策的制定提供依据,是黄河流域生态保护与高质量发展研究的基础性工作。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

研究区地处青藏高原东北部,是青藏高原生态屏障的重要组成部分,属高原地貌类型,为侵蚀构造的高原山地景观,地形复杂(图 1a),属于高原高寒湿润气候,具有大陆性季节气候的特点,长冬无夏,春秋相连且短促。本区属于甘南黄河水源补给重点生态功能区,该生态功能区主要分为水源涵养功能区和水土流失控制区 2 个生态保护与建设区,本文仅对水源涵养功能区进行研究,行政区域包括甘肃省南部甘南州的 6 个县(市),即合作市、玛曲县、碌曲县、夏河县、临潭县和卓尼县(图 1b)。草地是研究区面积最大的生态系统,对水源涵养具有决定性作用,玛曲县、碌曲县、夏河县和合作市是草地分布的主体区域。《1:100 万中国草地资源图》采用草地植被—生境分类系统(VHCS),将研究区草地分为高寒草甸、山地草甸、温性草原和沼泽 4 种主要的草地类(图 1c)。

### 1.2 数据来源

1.2.1 土壤样本的采集与土壤属性的测定 地面观测数据采集时间为 2021 年 7—8 月,项目组成员分批次前往研究区进行草地的样方调查和采样,随机采样点共计 130 个(图 1)。采样时应尽可能遵循大均匀小随机布点法<sup>[21]</sup>,且采样点位置的直线距离至少间

隔 1 km。在每个样点中设置间隔至少为 100 m 的 2 个小样方(50 cm×50 cm),拍照记录每个样地的编号、经纬度、海拔、植被和景观信息,用环刀(规格为 100 cm)获取不同土层的土壤,称完鲜重后带回室内采用烘干法获取土壤含水量和容重数据。同时利用土钻按照五点法对 0—20 cm 土壤进行采集(0—10, 10—20 cm),将土样装入已标记的自封袋中,后经风干过筛后测定土壤养分含量。土壤理化指标测定步骤均参照鲍士旦<sup>[22]</sup>方法,土壤粒径组成用 Better-size2600 激光粒度分析仪测定(黏粒<0.002 mm;粉粒 0.002~0.05 mm;砂粒 0.05~2 mm)。

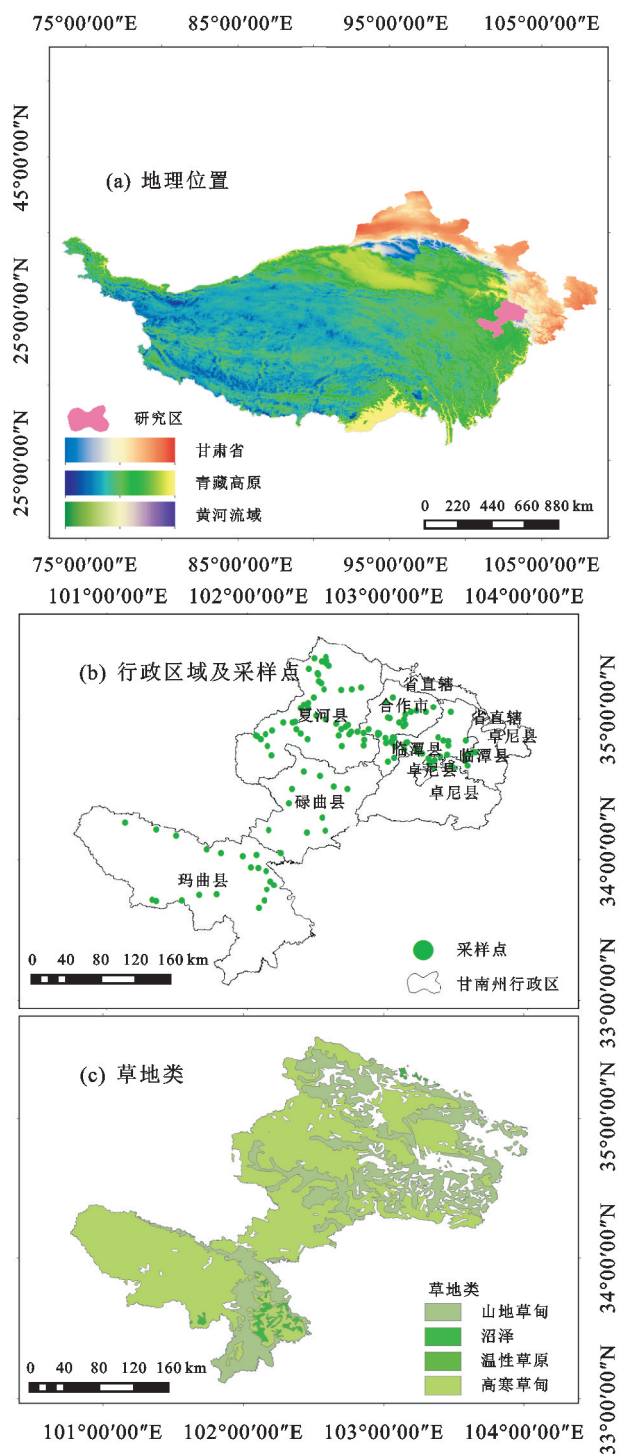


图 1 甘南水源涵养区示意

1.2.2 遥感数据来源与处理 本文采用的主要遥感数据包括 MODIS 反射率数据(MOD09A1)、MODIS 植被指数数据(MOD13A1)、MODIS 净初级生产力数据(MOD17A2H)、MODIS 叶面积指数数据(MOD15A2H)。数据来源于美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA),网址为 <https://www.earthdata.nasa.gov/>。利用研究区范围对下载的数据进行掩膜提取,并设置一致的分辨率和坐标系。此外,由于 MODIS 数据中伴随的云和雪的污染使得某些区域出现很高的不确定性值,因此在 Matlab 中运用线性插补法对异常值进行填充。MODIS 数据使用最大值合成法(MVC)合成月度数据集以减弱云和大气对数据的干扰<sup>[23]</sup>,并根据国际通用的季节分类准则将月数据合成春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12—翌年 2 月)4 个季节的值,最终生成年数据集<sup>[24]</sup>。

青藏高原的边界和 2015 年省级行政边界从中国科学院资源环境科学与数据中心下载(<https://www.resdc.cn/>)。甘肃省及甘南州行政区界线由甘肃省自然资源规划研究院提供,并按照县级行政区确定研究区范围。《1:100 万中国草地资源图》从中国草业与生态(<http://ecograss.lzu.edu.cn/>)中获得。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤水源涵养功能指数反演 首先,运用采样点经纬度提取 MODIS 反射率数据,通过土壤水源涵养功能相关指标与各波段相关性分析,选择与各指标相关性最强的波段,在 SPSS 软件中运用曲线估计法分别计算各模型的结果,通过对比分析筛选出最优模型;其次,分别建立偏最小二乘回归模型与多元线性回归模型;最后,将 3 个模型结果进一步比较,筛选出模拟 0—10,10—20 cm 各指标的最佳模型,并进行后续的验证和估计环节。土壤水源涵养功能相关指标有土壤 pH(pH)、电导率(EC)、土壤容重(BD)、有机碳(SOC)、阳离子交换量(CEC)、全磷(TP)、全氮(TN)、全钾(TK)、速效磷(AP)、碱解氮(AN)、速效钾(AK)、黏粒(Clay)、粉粒(Silt)和砂粒(Sand)。

基于以上结果,以土壤水源涵养功能相关指标为自变量,土壤含水量为因变量,运用偏最小二乘回归法、加权最小二乘回归和多元线性逐步回归对 0—10,10—20 cm 的土壤水源涵养功能指数建模,并对 3 种方法分别计算不同土层深度的土壤水源涵养功能指数进行验证(图 2),结果显示,加权最小二乘回归和多元线性逐步回归模型的  $R^2$  均低于偏最小二乘回归。因此,最终选择偏最小二乘回归模型分别估计



0—10,10—20 cm 的土壤水源涵养功能指数(表 1)。  
本文将研究中的土壤理化性质数据去除异常值,按照采样编号的顺序间隔抽取 2/3 的数据(71 个采样点)作为建模样本,其余 1/3 的数据(35 个采样点)作为验证

样本<sup>[25]</sup>。根据建模样本建立的模型计算验证样本点处的预测值,并计算预测值与实测值的决定系数( $R^2$ )和均方根误差(RMSE),运用回归方程较高的  $R^2$  和较低的 RMSE 可确定最优模型和精度评价<sup>[26]</sup>。

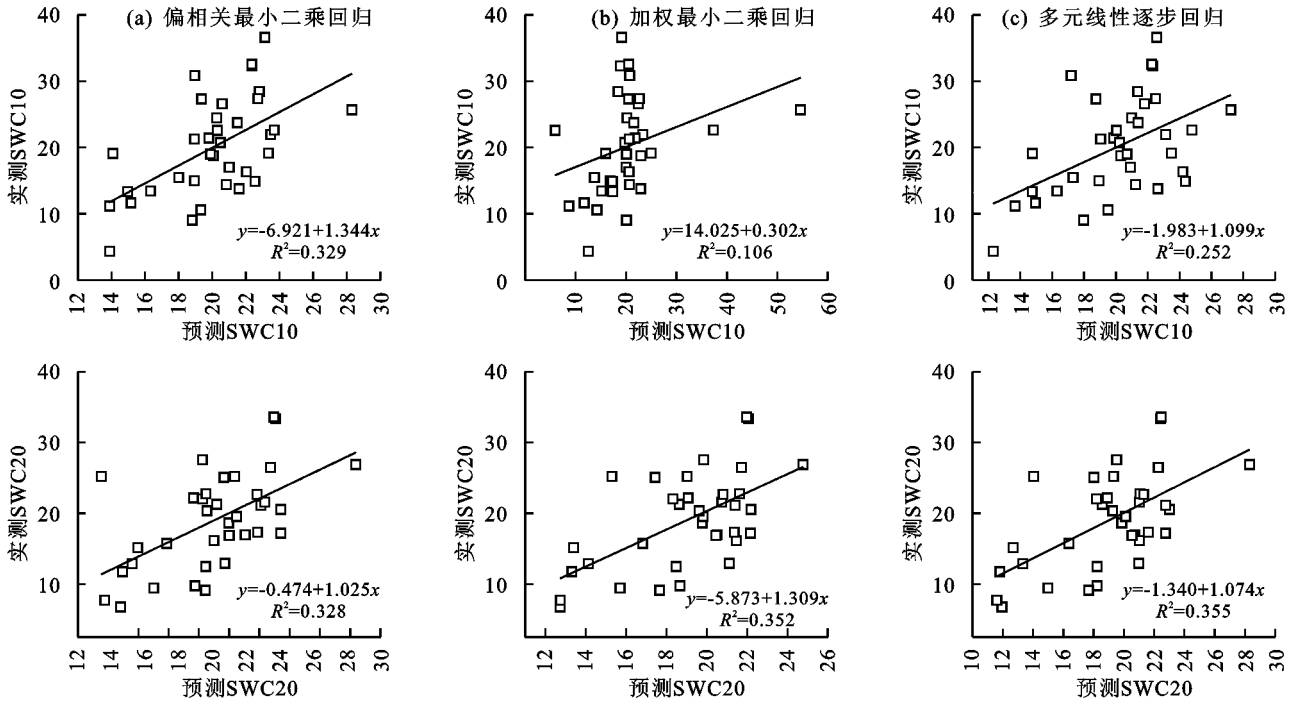


图 2 土壤水源涵养功能指数回归方程的精度验证

表 1 土壤水源涵养功能指数的最佳建模方程

土层深度/cm	建模方程	$R^2$	RMSE
0—10	$SWCF_{10} = 26.605 + 0.071 * EC - 4.681 * pH - 0.365 * CEC + 11.742 * BD +$	0.676	0.650
	$0.111 * SOC + 0.742 * TN + 4.248 * TP - 0.201 * Tk + 0.02 * AN -$		
	$0.093 * AP + 0.004 * AK + 0.085 * Silt - 0.365 * Clay - 0.052 * Sand$		
10—20	$SWCF_{20} = 29.799 + 0.001 * EC - 3.943 * pH - 0.441 * CEC + 11.645 * BD -$	0.696	0.672
	$0.034 * SOC + 0.317 * TN + 1.373 * TP + 0.014 * Tk + 0.035 * AN -$		
	$0.097 * AP + 0.002 * AK + 0.045 * Silt - 0.441 * Clay - 0.025 * Sand$		

1.3.2 综合植被指数评价 本研究中,主成分分析被用于降低植被状况参数相对高的相关性,主要是通过低维的方法解释净初级生产力、叶面积指数和植被覆盖度的大部分差异<sup>[27]</sup>。分别计算 NDVI、LAI 和 NPP 的 doy2021209 与 doy2021225 栅格影像的平均值,以与采样时期的土壤水源涵养功能测算相对应建立综合植被指数方程,最终可得综合植被指数:  $VEG = 0.357 * LAI + 0.359 * NDVI + 0.284 * NPP$ 。  
1.3.3 耦合协调度模型与判断标准 耦合协调度模型可以判断 2 个系统间的耦合关系是否处于良性状态,进一步反映二者的耦合协调程度,土壤水源涵养功能—植被系统的耦合度模型和耦合协调度模型可参考已有相关研究<sup>[13,15]</sup>。耦合协调度等级划分目前还没有统一的标准,为了更准确地反映 2 个系统间的耦合协调关系,本研究在综合前人<sup>[13,15]</sup>研究的基础上,

根据耦合协调度的大小,以及本研究区土壤水源涵养功能(SWCF)与植被生长状况(VEG) 的比值,对土壤水源涵养功能—植被的耦合协调模式进行分类。

2 结果与分析

2.1 土壤水源涵养功能指数的时空分布特征

2.1.1 时间变化特征 由表 2 可知,2000—2021 年 SWCF 趋势分析回归方程的斜率均为正值,说明 22 年间 SWCF 在各个季节上为增加趋势。其中夏季各土层的斜率值最大,变化速度最快,春季变化速度仅次于夏季,而秋季和冬季的斜率值最小,变化速度最慢。

2000—2021 年 SWCF 平均值的结果(图 3)表明,0—10,10—20 cm 夏季 SWCF 的平均值均最高,秋季的平均值仅次于夏季,说明夏季土壤涵养水源的能力最强,其次为秋季。此外,0—10,20—30 cm 春

季平均值高于冬季,而 10—20 cm 冬季的平均值略微高于春季。因此,0—10 cm 的季节平均值表现为夏季>秋季>春季>冬季,10—20 cm 的则为夏季>秋季>冬季>春季。

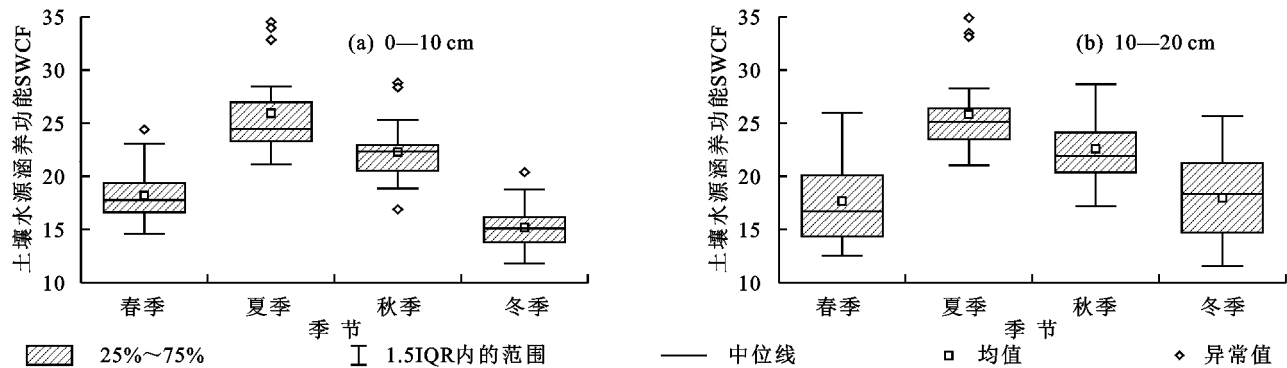


图 3 2000—2021 年不同土层深度 SWCF

2.1.2 空间分布特征 由图 4 可知,2000—2021 年 SWCF 平均值的空间分布格局,局部低值主要分布在研究区北部、东部和南部,局部高值出现在西部和南部。

表 2 2000—2021 年 SWCF 回归方程的斜率

土层深度/cm	春季	夏季	秋季	冬季
0—10	0.188	0.252	0.095	0.114
10—20	0.240	0.340	0.099	0.030

夏季和秋季的空间分布相似,高值区明显多于低值区;春季表现为 0—10 cm 的低值区域较少,而 10—20 cm 的则相反;在冬季,10—20 cm 的比 0—10 cm 的低值区多于高值区,且高低值分界明显。

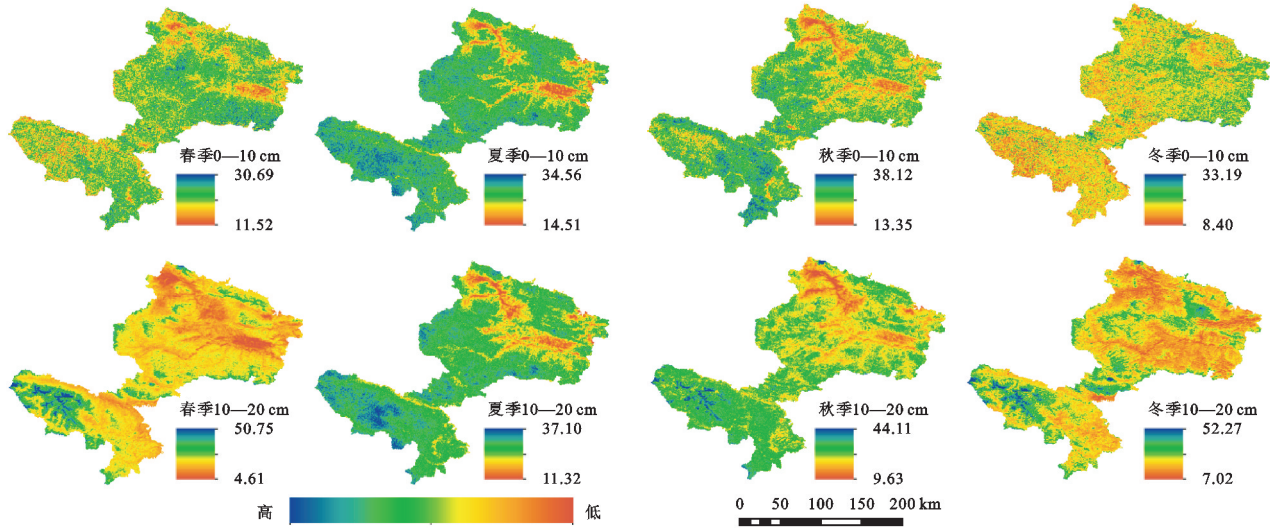


图 4 2000—2021 年 SWCF 均值的空间分布

2.2 植被状况时空分布特征

2.2.1 时间变化特征 2000—2021 年各个季节 VEG 回归方程的斜率值均为正,呈增加趋势(图 5a)。根据斜率值的大小可判断不同季节的变化速度快慢为春季>夏季>秋季>冬季,其中春季和夏季 VEG 的波动变化明显,而冬季的最稳定。图 5b 的结果显示,研究区 22 年季节的 VEG 平均值差异显著,表现为夏季(0.649)>秋季(0.453)>春季(0.344)>冬季(0.179)。

2.2.2 空间分布特征 VEG 季均值空间分布的差异显著,夏季的高值区域所占的面积比例最大,而冬季则恰好相反,各个季节的高值大多分布在研究区东部的部分区域,这些地区基本上均为林地(图 6)。

2.3 土壤水源涵养功能与植被恢复/退化的时空耦合关系

2.3.1 土壤水源涵养功能与植被的时空耦合关系 由表 3 可以看出,各个季节的 SWCF—VEG 耦合度和耦合协调度均呈增加趋势,除 0—10 cm 冬季的耦合度以及 10—20 cm 秋季的耦合度和耦合协调度,这说明 2000—2021 年期间 SWCF 与 VEG 的耦合作用和协调作用随时间不断提高,且二者呈正向同步发展的态势。

从图 7 可以看出,耦合度值均在 0.8 以上,不同季节 SWCF—VEG 的耦合度各异,同时各土层深度的耦合协调度值在季节上表现为夏季>秋季>春季>冬季。此外,依据耦合协调度的类型划分可知,春季和秋季各土层深度耦合协调度的范围为[0.4, 0.6],处于勉强协调状态;夏季的 0—10 cm 为勉强协

调,10—20 cm 则处于良好协调;冬季的 0—10,10—20 cm 均处于勉强协调。

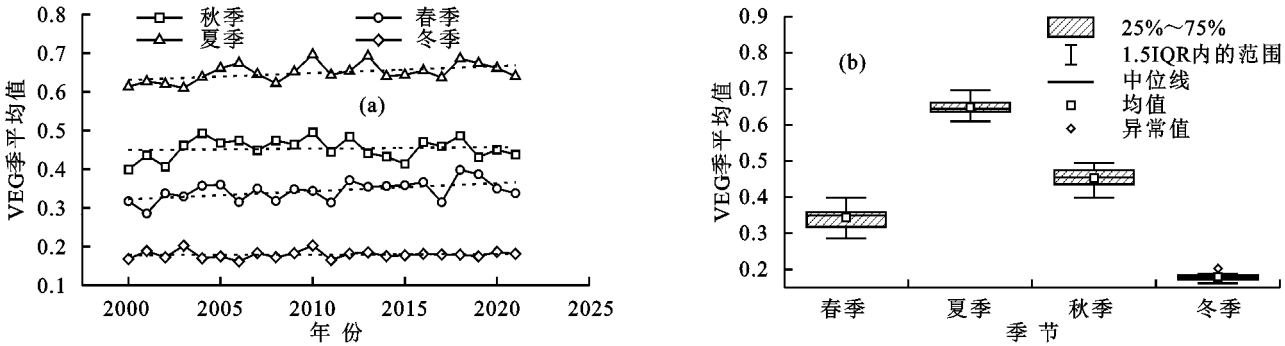


图 5 2000—2021 年 VEG 的季均值及其变化

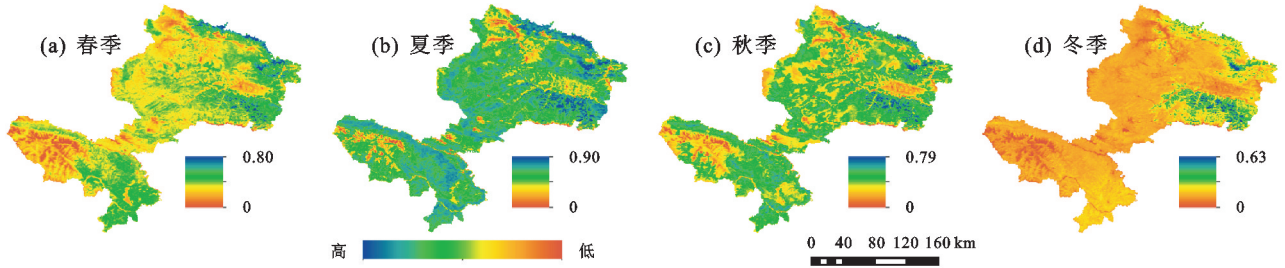


图 6 2000—2021 年 VEG 平均值的空间分布

表 3 SWCF—VEG 耦合度和耦合协调度的时序变化趋势

季节	0—10 cm		10—20 cm	
	耦合度	耦合协调度	耦合度	耦合协调度
春季	+	+	+	+
夏季	+	+	+	+
秋季	+	+	—	—
冬季	—	+	+	+

各季节 SWCF—VEG 耦合协调类型的空间分布差异明显(图 8),春季和秋季面积比例最高的主要为

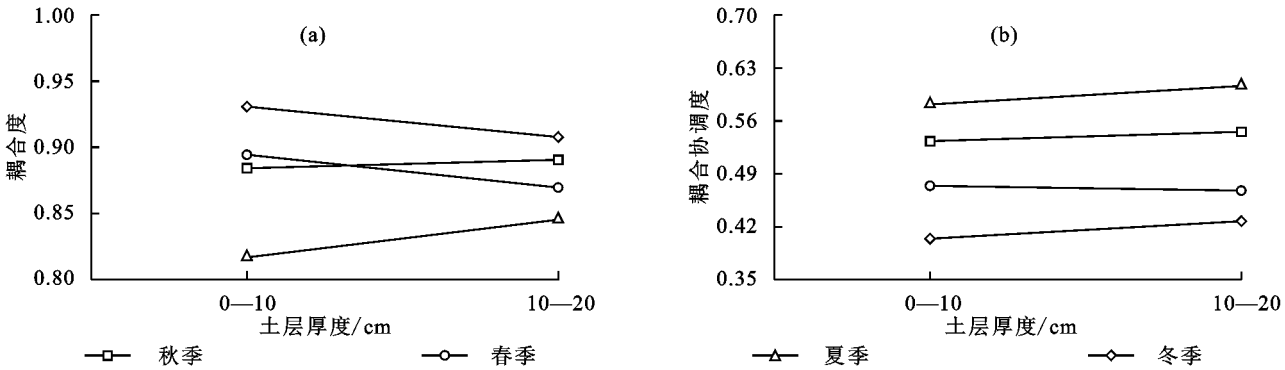


图 7 不同土层深度 SWCF—VEG 的耦合度和耦合协调度

2.3.2 不同草地类型植被与土壤水源涵养功能的时空耦合关系 草地生态系统各季节 SWCF—VEG 耦合协调度的时序变化趋势见表 4。除了秋季和冬季的部分土层深度,季节上各草地类型的值均为增加趋势。草地生态系统 SWCF—VEG 耦合协调度平均值的结果显示,各季节温性草原不同土层深度的耦合协调度值均最大,且夏季、秋季和冬季各草地类型的值均表现为 10—20 cm>0—10 cm(图 9)。

根据耦合协调度模型的判断标准得出草地生态系

“勉强协调—VEG 与 SWCF 同步发展型”,其次为“勉强协调—SWCF 滞后发展型”;夏季的“勉强协调—VEG 与 SWCF 同步发展型”和“良好协调—VEG 与 SWCF 同步发展型”最显著;冬季主要由“严重失调—SWCF 滞后发展型”和“勉强协调—SWCF 滞后发展型”2 种类型组成,其中 10—20 cm“勉强协调—SWCF 滞后发展型”的面积比例高于“严重失调—SWCF 滞后发展型”,0—10 cm 的则相反。

统各季节的耦合协调发展类型(表 5)。从表 5 可以看出,除冬季 0—10 cm 高寒草甸的耦合模式为严重失调,夏季 10—20 cm 的高寒草甸、温性草原和沼泽为良好协调,其他季节上的草地类型均为勉强协调发展。此外,春季的高寒草甸在各土层深度的耦合协调特征表现为 VEG 滞后发展型,春季和夏季的温性草原在各土层深度表现为 SWCF 滞后发展型,各草地类型在冬季的不同土层深度表现为 VEG 滞后发展型,其他草地类型在季节上的耦合协调特征均为 VEG 与 SWCF 同步发展型。

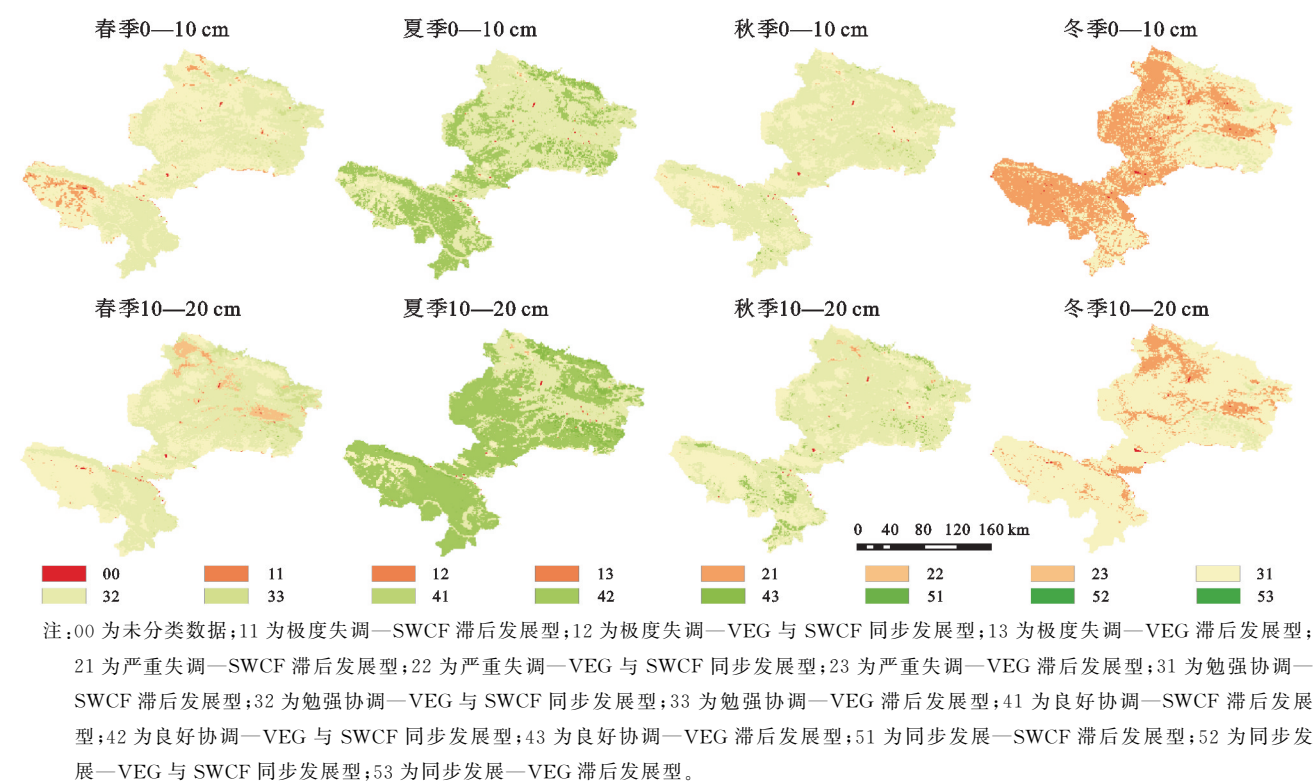


图 8 SWCF-VEG 耦合协调类型的空间分布

表 4 草地生态系统 SWCF-VEG 耦合协调度的时序变化趋势

季节	0—10 cm				10—20 cm			
	高寒草甸	山地草甸	温性草原	沼泽	高寒草甸	山地草甸	温性草原	沼泽
春季	+	+	+	+	+	+	+	+
夏季	+	+	+	+	+	+	+	+
秋季	+	+	+	—	—	+	—	—
冬季	+	+	+	+	+	+	—	+

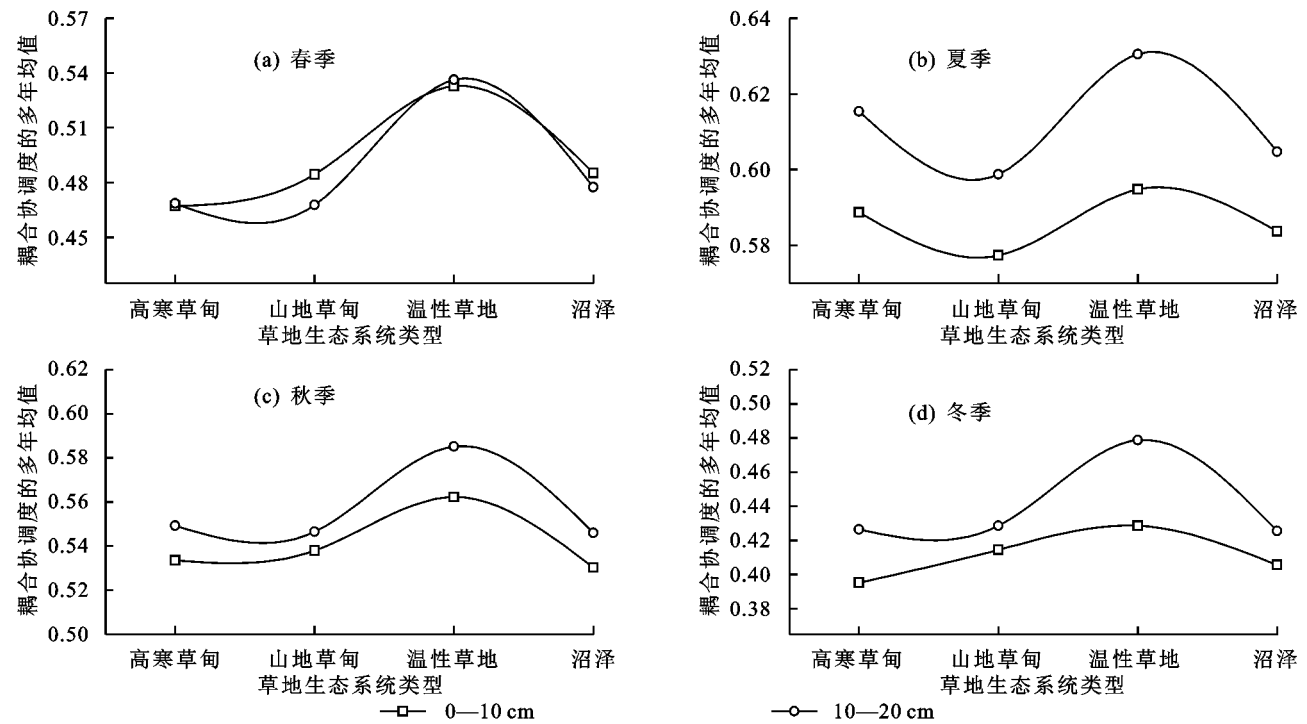


图 9 草地生态系统不同土层深度 SWCF-VEG 的耦合协调度

3 讨论

基于 MODIS 数据的结果显示,甘南黄河水源涵

养区不同季节的水源涵养能力在 0—10 cm 表现为夏季>秋季>春季>冬季,10—20 cm 表现为夏季>秋



季>冬季>春季。刘艳清等<sup>[28]</sup>研究表明,武夷山国家公园 4 种植被类型不同季节的水源涵养能力强弱均为秋季>夏季>春季>冬季,2 个研究的结果存在相似之处,即夏季和秋季的均高于春季和冬季。然而,本文和刘艳清等<sup>[28]</sup>与冯娟<sup>[29]</sup>的研究结果不同,其运用最新的生态系统服务评估模型 InVEST 模型和传统分布式水文模型 SWAT 模型探究了秦岭北麓沔河中上游流域的水源涵养能力,在季节上表现为夏季>春季>秋季>冬季,由于降水量是影响水源涵养时间变化的主要因

素<sup>[30]</sup>,因此形成这种结果差异的原因可能是研究区气候的异质性。此外,本研究将 NPP、LAI、NDVI 数据作为植被状态数据,采用主成分分析方法对植被进行综合评价表明,2000—2021 年 VEG 综合植被指数在季节上整体均呈增加趋势,且各季节均值具有显著差异,表现为夏季>秋季>春季>冬季,此结果与轩俊伟等<sup>[31]</sup>研究结果相同,这可能是因为植被状况的季节异质性与物候息息相关,且温度和降水的周期性变化是植被季节性变化的直接原因<sup>[32]</sup>。

表 5 草地生态系统 SWCF-VEG 的耦合协调发展类型

季节	土层深度/cm	高寒草甸	山地草甸	温性草原	沼泽
春季	0—10	勉强协调-VEG 滞后	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步	勉强协调-SWCF 滞后	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步
	10—20	勉强协调-VEG 滞后	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步	勉强协调-SWCF 滞后	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步
夏季	0—10	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步	勉强协调-SWCF 滞后	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步
	10—20	良好协调-VEG 与 SWCF 同步	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步	良好协调-SWCF 滞后	良好协调-VEG 与 SWCF 同步
秋季	0—10	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步
	10—20	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步	勉强协调-VEG 与 SWCF 同步
冬季	0—10	严重失调-VEG 滞后	勉强协调-VEG 滞后	勉强协调-VEG 滞后	勉强协调-VEG 滞后
	10—20	勉强协调-VEG 滞后	勉强协调-VEG 滞后	勉强协调-VEG 滞后	勉强协调-VEG 滞后

已有研究<sup>[33]</sup>表明,植被类型以及土地覆盖的差异均在不同程度上影响土壤的水源涵养功能,如刘艳清等<sup>[28]</sup>的研究结果显示,武夷山国家公园不同植被类型的水源涵养能力大小为常绿阔叶林>针阔混交林>针叶林和矮林>草甸;于忠亮等<sup>[34]</sup>研究证明,不同植被类型的水源涵养能力大小为阔叶林>针阔混交林>针叶林>灌木林>草地>农田。此外,王皓月等<sup>[14]</sup>研究指出,九峰山不同人工林分类型土壤—植被系统之间是天然耦合的,耦合协调度分析可以反映土壤—植被系统间的互动关系,评价两者间的耦合状态。目前已有的研究大多在样地、不同林分类型以及小流域等尺度建立指标的耦合评价,而在较广的空间尺度的研究比较罕见,因此,与已有探索不同植被恢复模式<sup>[13]</sup>、不同林分类型<sup>[14]</sup>、不同土地利用方式<sup>[17]</sup>下植被—土壤系统耦合关系评价的研究类似,本文探索了甘南黄河水源涵养区不同季节各草地类型的时空耦合协调度,填补了高寒草地生态系统土壤—水文—植被研究的空白,对草地资源的合理运用以及生态系统的可持续发展具有重要意义。

本文的结果显示,应用耦合协调度模型评价方法适用于对黄河源区植被和土壤 2 个子系统间时空耦合关系的研究,但由于研究区属于高山地区,野外采样时务必形成误差,同时遥感数据可能存在融合现象,且草地生态系统植被—土壤耦合关系的研究是从对整个研究区的结果中划分出来的。而已有研究<sup>[9]</sup>

证实,土壤—水文—植被耦合过程在很大程度上受到尺度的影响,在一个尺度上观察到的现象或总结出的规律在另一个尺度上可能并不适用,因此在今后的相关研究中还需对研究区的小尺度上以及其他研究区域尺度进一步验证和完善。

## 4 结论

(1)基于各采样点的 MODIS 反射率数据,以 B1~B7 波段值为自变量,实测土壤水源涵养指标值为因变量建立不同土层深度的土壤水源涵养功能指标模型。同时,选择最优的偏最小二乘回归模型,以土壤水源涵养功能相关指标为自变量,土壤含水量为因变量分别对不同土层深度的土壤水源涵养功能指数建模,经验证可知模型精度较高,满足研究需求。

(2)经过对研究区不同土层深度耦合协调度的计算及分类标准的建立,各季节 SWCF-VEG 耦合协调类型的空间分布差异明显,春季、夏季和秋季的耦合协调特征均为“VEG 与 SWCF 同步发展型”,而冬季的则为“SWCF 滞后发展型”,且在今后实践运用中,还应根据各季节的耦合模式提出区域管理措施及可持续发展对策,具体表现为春季和秋季的“勉强协调”,夏季的“勉强协调”和“良好协调”以及冬季的“严重失调”和“勉强协调”。

(3)2000—2021 年季节上各草地类型的 SWCF-VEG 耦合协调度均为增加趋势,且相比于其他草地类型,温性草原 SWCF-VEG 耦合协调的作用最强。



此外,各草地类型不同季节的耦合协调发展类型不尽相同,整体上呈现不同程度的勉强协调状态,在今后的生态恢复过程中应对不同季节对各草地类型实施不同的措施。

#### 参考文献:

- [1] Liu Y Y, Yang Y, Wang Q, et al. Evaluating the responses of net primary productivity and carbon use efficiency of global grassland to climate variability along an aridity gradient[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 671-682.
- [2] 张雪峰,牛建明,张庆,等.内蒙古锡林河流域草地生态系统水源涵养功能空间格局[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(4): 814-821.
- [3] Zheng Z T, Zhu W Q, Zhang Y j. Seasonally and spatially varied controls of climatic factors on net primary productivity in alpine grasslands on the Tibetan Plateau [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 21: e00814.
- [4] 董伟,蒋仲安,苏德,等.长江上游水源涵养区界定及生态安全影响因素分析[J]. *北京科技大学学报*, 2010, 32(2): 139-144.
- [5] Wang Y C, Zhao J, Fu J W, et al. Effects of the Grain for Green Program on the water ecosystem services in an arid area of China: Using the Shiyang River Basin as an example[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 659-668.
- [6] 周冰玉,李志威,田世民,等.黄河源区水源涵养能力研究综述[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(4): 87-93.
- [7] Ehrenfeld J G, Ravit B, Elgersma K. Feedback in the plant-soil system [J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2005, 30(1): 75-115.
- [8] Gutiérrez-Jurado H A, Vivoni E R, Harrison J B J, et al. Ecohydrology of root zone water fluxes and soil development in complex semiarid rangelands [J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(15): 3289-3316.
- [9] 李中恺,李小雁,周沙,等.土壤—植被—水文耦合过程与机制研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(11): 2105-2138.
- [10] Fatichi S, Ivanov V Y, Caporali E. A mechanistic ecohydrological model to investigate complex interactions in cold and warm water-controlled environments; 1. Theoretical framework and plot-scale analysis [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2012, 4(2): 1-31.
- [11] 吕宸,宫渊波,龚伟,等.川西高寒山地灌丛草甸土壤水文效应特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(5): 1170-1177.
- [12] 张智才,闫玉春,邵振艳.草原植被—土壤的关系及对干扰响应差异研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(5): 121-127.
- [13] 徐明,张健,刘国彬,等.不同植被恢复模式沟谷地植被—土壤系统耦合关系评价[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(12): 2137-2146.
- [14] 王皓月,郭月峰,徐雅洁,等.九峰山不同林分类型生态恢复植被—土壤系统耦合关系评价[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(12): 2309-2316.
- [15] 彭晚霞,宋同清,曾馥平,等.喀斯特峰丛洼地退耕还林还草工程的植被土壤耦合协调度模型[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 305-310.
- [16] 李豪,卢纪元,魏天兴,等.陕北黄土高原不同微地形下植被—土壤系统耦合特征研究[J]. *四川农业大学学报*, 2019, 37(2): 192-198.
- [17] 白一茹,阮晓晗,包维斌,等.宁南山区坡面不同土地利用方式下植被—土壤耦合关系评价[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 251-258.
- [18] Yigini Y, Panagos P. Assessment of soil organic carbon stocks under future climate and land cover changes in Europe [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557/558: 838-850.
- [19] Xu F, Zhao L L, Jia Y W, et al. Evaluation of water conservation function of Beiji River Basin in Nanling Mountains, China, based on WEP-L model [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 134: e108383.
- [20] Li C, Zhang S Q, Cui M Y, et al. Improved vegetation ecological quality of the three-north shelterbelt project region of China during 2000—2020 as evidenced from multiple remotely sensed indicators [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(22): e5708.
- [21] 王晓军,武江涛,王兵,等.基于影像分析的黄土丘陵沟壑区土壤水分采样研究[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 181-186.
- [22] 鲍士旦.土壤农化分析[M]. 3版.北京:中国农业出版社, 2000.
- [23] Justice C O, Holben B N, Gwynne M D. Monitoring East African vegetation using AVHRR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1453-1474.
- [24] Ma R, Xia C, Liu Y, et al. Spatiotemporal change of net primary productivity and its response to climate change in temperate grasslands of China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: e108383.
- [25] Madonsela S, Cho M A, Ramoelo A, et al. Estimating tree species diversity in the savannah using NDVI and woody canopy cover [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 66: 106-115.
- [26] Mngadi M, Odindi J, Mutanga O, et al. Estimating aboveground net primary productivity of reforested trees in an urban landscape using biophysical variables and remotely sensed data [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 802: e149958.

- [14] Li C, Jia Z H, Peng X N, et al. Functions of mineral-solubilizing microbes and a water retaining agent for the remediation of abandoned mine sites[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 761: e143215.
- [15] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 等. 秸秆纤维、聚丙烯酰胺及高吸水树脂在岩石边坡植被护坡中的效应[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(2): 257-267.
- [16] Gao G J, Yuan J G, Han R H, et al. Characteristics of the optimum combination of synthetic soils by plant and soil properties used for rock slope restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 30(4): 303-311.
- [17] 张易帆, 刘家, 王雪, 等. 保水剂和水泥含量对切挖边坡人工土壤钾素的影响[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2023, 60(1): 165-171.
- [18] 刘川, 查轩, 黄少燕, 等. 保水剂施用方式对花岗岩红壤坡面水土保持的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 110-115.
- [19] 侯贤清, 李荣, 何文寿, 等. 保水剂施用量对旱作土壤理化性质及马铃薯生长的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 325-330.
- [20] 柳霖, 高峰, 韩宁, 等. 基于黑木耳菌渣的生菜栽培基质研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2021, 47(4): 492-506.
- [21] 程志强, 赵利, 刘丹, 等. 聚丙烯酸钾/白灵菇菌糠复合高吸水树脂的制备与性能[J]. *中国塑料*, 2014, 28(10): 45-51.
- [22] Wei P, Chen W W, Song Q H, et al. Superabsorbent hydrogels enhanced by quaternized tunicate cellulose nanocrystals with adjustable strength and swelling ratio[J]. *Cellulose*, 2021, 28(6): 3723-3732.
- [23] 王翠玲, 侯宝龙, 刘书林, 等. 聚(丙烯酸-醋酸乙烯酯)-聚乙烯醇互穿网络高吸水性树脂的合成[J]. *精细化工*, 2015, 32(3): 245-249, 288.
- [24] 王悦, 王金满, 时文婷, 等. 降雨强度与微地形塑造对露天煤矿排土场边坡土壤水分的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 241-249.
- [25] 中华人民共和国农业部. 农林保水剂: NY/T 886—2016[S]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 125-190.
- [27] 张莹, 田龙, 徐敏慧, 等. 食用茵茵糠综合利用研究进展[J]. *微生物学通报*, 2020, 47(11): 3658-3670.
- [28] 高桂林, 沈葵忠, 房桂干, 等. 桉木纤维素接枝丙烯酸制备高吸水树脂的条件优化[J]. *化工新型材料*, 2014, 42(4): 129-131, 135.
- [29] 程志强. 菌糠基复合高吸水树脂的制备及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [30] 谢浩, 刘白玲, 王文浩, 等. 聚氨酯的生态固沙性能及其与聚醋酸乙烯酯乳液的对比[J]. *高分子材料科学与工程*, 2018, 34(3): 87-92.
- [31] 刘亚琦, 黄占斌, 林杉, 等. 10 种农用保水剂基本性能的比较研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(6): 147-151.
- [32] 张璐, 孙向阳, 田赞, 等. 复合保水剂吸水保水性能及其应用[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(15): 87-93.
- [33] 郭天财, 宋晓, 马冬云, 等. 施氮量对冬小麦根际土壤酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 110-114.
- [34] Venda Oliveira P, Correia A A S, Cajada J C A. Effect of the type of soil on the cyclic behaviour of chemically stabilised soils unreinforced and reinforced with polypropylene fibres[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 115: 336-343.
- [35] Duong N T, Satomi T, Takahashi H. Potential of corn husk fiber for reinforcing cemented soil with high water content[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 271: e121848.
- [36] 朱琳, 裴宗平, 卢中华, 等. 不同基质比对边坡修复植物生长的影响研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(19): 260-265.
- [37] 王丽, 张金池, 张小庆, 等. 土壤保水剂含量对喷播基质物理性质及抗冲性能的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 79-82.

(上接第 251 页)

- [27] Zhou F C, Han X Z, Tang S H, et al. An improved model for evaluating ecosystem service values using land use/cover and vegetation parameters[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1): 148-156.
- [28] 刘艳清, 黄石德, 徐丹丹, 等. 基于 Sentinel-2 影像的武夷山国家公园海拔梯度上不同植被类型的水源涵养能力[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(12): 2406-2413.
- [29] 冯娟. 基于 InVEST 模型和 SWAT 模型的秦岭北麓水源涵养时空格局分析: 以沔河中上游流域为例[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- [30] 贾雨凡, 杨勤丽, 胡非池, 等. 变化环境下的水源涵养能力评估研究进展[J]. *水利水运工程学报*, 2022(1): 37-47.
- [31] 轩俊伟, 盛建东. 2001—2017 年新疆玛纳斯河流域植被 NDVI 时空变化特征[J]. *林业资源管理*, 2018(6): 30-37.
- [32] Bao Y J, Song G B, Li Z H, et al. Study on the spatial differences and its time lag effect on climatic factors of the vegetation in the Longitudinal Range-Gorge Region[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(2): 42-49.
- [33] 杨晓晖, 张克斌, 侯瑞萍. 封育措施对半干旱沙地草场植被群落特征及地上生物量的影响[J]. *生态环境*, 2005, 14(5): 730-734.
- [34] 于忠亮, 付世萃, 王梓默, 等. 吉林省辽河流域不同植被类型土壤水源涵养能力分析[J]. *中国水土保持*, 2022(7): 51-55.