

DOI: 10.5846/stxb202010232699

胡健, 胡金娇, 吕一河. 基于黄土高原关键带类型的土地利用和年径流产沙关系空间分异研究. 生态学报, 2021, 41(16)

Hu J, Hu J J, Lü Y H. Spatial variation of the relationship between annual runoff and sediment yield and land uses based on the regional critical zone differentiation in the Loss Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16)

# 基于黄土高原关键带类型的土地利用和年径流产沙关系空间分异研究

胡 健<sup>1,2</sup>, 胡金娇<sup>1,2</sup>, 吕一河<sup>3,4,\*</sup>

1 西南民族大学国家民委若尔盖高寒草甸生态站, 四川 成都 610041

2 西南民族大学青藏高原研究院, 四川 成都 610041

3 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

4 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 区域植被恢复改变了土地利用类型, 从而有效控制了水土流失, 但土地利用与水土流失关系的空间分异尚未明晰。本文整合了黄土高原坡面径流小区试验观测研究文献 59 篇和 1121 条年径流产沙记录, 以 8 大关键带类型作为空间分层依据, 采用地理探测器分析了土地利用与年径流产沙关系的空间分异。结果显示: 撂荒地的年均径流量和产沙量最高分别为 35.99 mm 和 4208.82 g/m<sup>2</sup>, 撂荒地、裸地和耕地的产流产沙能力显著高于人工草地、林地、自然草地和灌丛, 灌丛和林地的年均产沙量显著低于人工和自然草地 ( $P < 0.05$ ); 除了撂荒地的年均产沙量在山地森林关键带最高 (16240.40 g/m<sup>2</sup>) 外, 在丘陵沟壑农林草交错关键带的撂荒地年均径流产沙显著高于丘陵农业-草地关键带, 丘陵沟壑农林草交错关键带和丘陵农业-草地关键带裸地、耕地的产流产沙能力较高, 人工草地和灌丛年均产沙量显著高于其他关键带类型 ( $P < 0.05$ ); 在山地森林关键带的林地年均径流量、径流系数和产沙量最低, 分别为 1.56 mm、0.41% 和 307.36 g/m<sup>2</sup>, 而自然草地在各关键带类型都有较高的年均产流量和较低的年均产沙量; 坡面径流小区的局地特征 (如土地利用、面积、坡度、坡长) 是影响年径流产沙关键带分异的首要因素, 且存在多因子互动、非线性增强的关系。这些结果表明植被恢复能有效地保持水土, 但是区域植被恢复时需要选择合适的类型, 黄土丘陵沟壑区应首选自然草地、灌丛和林地。本研究可为黄土高原区域植被恢复的优化配置提供科学依据。

**关键词:** 地球关键带; 土壤侵蚀; 土地利用; 地理探测器; 空间异质性

## Spatial variation of the relationship between annual runoff and sediment yield and land uses based on the regional critical zone differentiation in the Loss Plateau

HU Jian<sup>1,2</sup>, HU Jinjiao<sup>1,2</sup>, LÜ Yihe<sup>3,4</sup>

1 The Zoige Alpine Meadow Ecological Station of National Ethnic Affairs Commission, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China

2 Institute of Qinghai-Tibetan Plateau, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Regional vegetation recovery can change the land use types and effectively control soil and water loss. However, the spatial variation of the relationship between land uses and soil and water loss remains unclear. In this study, we integrated 59 peer-reviewed articles and 1121 records of annual runoff and sediment yield of runoff plots at the hillslope on

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501601); 中国科学院战略性先导科技专项 (A) (XDA23070201); 西南民族大学中央高校基本科研业务费国家民委若尔盖高寒草甸生态站专项资助 (2020PTJS24003)

**收稿日期:** 2020-10-23;

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyh@rcees.ac.cn

the Loess Plateau. And, we used geodetector to determine the spatial differentiation of the relationship between annual runoff, annual sediment yield, and land use by regarding the eight critical zones (CZs) of Loess Plateau as a basis of spatial strata, which was classified by comprehensive methods combining the theory of earth's critical zone with principal component analysis and cluster analysis. The results showed that abandoned land had the highest annual mean runoff and sediment yield at 35.99 mm and 4208.82 g/m<sup>2</sup>, respectively. The abandoned land, bare land, and cropland had a higher ability to yield runoff and sediment than artificial grassland, forest, natural grassland, and shrubland. The annual mean sediment yields of shrubland and forest were significantly lower than that of artificial and natural grassland ( $P < 0.05$ ). Annual mean runoff and sediment yield of abandoned land in the hilly-gully agriculture-grassland-woodland transition CZ were significantly higher than that of the hilly-gully agriculture and grassland CZ in addition to abandoned land had the highest annual mean sediment yield in the mountainous forest CZ ( $P < 0.05$ ). Forests in the mountainous forest CZ had the lowest annual mean runoff, runoff coefficient, and sediment yield at 1.56 mm, 0.41%, and 307.36 g/m<sup>2</sup>, respectively while natural grassland in all CZs had highly annual mean runoff and lowly annual mean sediment yield ( $P < 0.05$ ). Furthermore, site-specific characteristics of runoff plots at the hillslope such as land uses, area, slope, and slope length were the first controlling factors to affect the difference of annual runoff and sediment yield in CZs. There are interactions among these multiple factors along with nonlinear enhanced relationships. The results indicate that vegetation recovery can effectively retain soil and water, but we need to select suitable types when implementing regional vegetation restoration, and the priority is to select natural grassland, shrubland, and forest in the loess hilly and gully region. Our study can provide a scientific basis for the optimal allocation of vegetation restoration on the Loess Plateau.

**Key Words:** Earth's critical zone; soil erosion; land use; geodetector; spatial heterogeneity

地球关键带是指异质的近地表环境,其纵向的空间界限为上到植被冠层,下到地下水层底部,它包含着近地表的生物圈、大气圈、整个土壤圈、水圈和岩石圈地表/近地表部分;其在水平方向上既包括已经风化的松散层,又包括植被、河流、湖泊、海岸带与浅海环境<sup>[1]</sup>。关键带科学(Critical zone science)的综合研究成为了新的研究机遇和研究前沿<sup>[2]</sup>,有助于地球系统科学应对 21 世纪全球可持续发展的挑战<sup>[3]</sup>。关键带观测站及其网络的建设进展显著,全球大约已有 70 个关键带观测台站<sup>[4-5]</sup>。由于地球关键带表层具有高度的空间异质性,需要进一步扩展单个关键带观测站及其网络,描绘关键带空间分异的特性成为关键带科学新的机遇与挑战<sup>[6-7]</sup>。目前已有的黄土高原关键带类型分类可为优化和合理设计区域关键带观测站网布局和研究水土生态过程的空间分异提供框架<sup>[8-9]</sup>。

土壤侵蚀是地球关键带表层演化的重要驱动力,也是引起土壤退化的重要因素<sup>[10]</sup>。土壤侵蚀研究是全球研究的热点领域和关键带研究的重要内容<sup>[4,11]</sup>。坡面径流小区和小流域的径流产沙监测是土壤侵蚀常用的研究方法,基于试验的径流产沙观测是评估土壤侵蚀强度的最直接数据源<sup>[12-13]</sup>。现有针对径流小区和小流域观测的整合研究涉及欧洲<sup>[14-15]</sup>、湿润的热带区域<sup>[16]</sup>、黄土高原<sup>[17-18]</sup>和全球尺度<sup>[19-20]</sup>等不同区域和空间尺度,揭示了土地利用和管理措施对土壤侵蚀的效应及其空间分异。因此,利用文献记录的径流小区试验观测资料为理解区域的土壤侵蚀背景及其空间差异提供了新途径。

近 20 年黄土高原成为土壤侵蚀研究的热点区域,径流小区试验观测研究分布广,研究议题主要集中于局地尺度土地利用类型转变对径流和产沙的影响,尽管已有研究对土壤侵蚀和水土保持措施进行了综述,但是研究的尺度多仅限于某一流域或样地尺度<sup>[21-22]</sup>。黄土高原实施了大量的水土保持措施,特别是在 1999 年开始实施的退耕还林(草)工程,促进了生态脆弱的土地类型(如裸地、坡耕地和新撂荒地)向有利于水土保持的土地类型(如人工或自然草地、灌丛和森林)转变,使黄土高原成为中国植被恢复成效最显著的地区<sup>[23-24]</sup>。然而,由于缺乏充足观测数据的支持,目前关注区域土地利用下径流和产沙的空间分异特征的研究较少。整合分析(Meta-analysis)和关键带类型分类为研究黄土高原区域径流和产沙的空间分异提供了有效

工具和宏观框架。

本研究通过整合黄土高原坡面径流小区尺度的径流产沙监测数据,定量评估黄土高原区域不同土地利用类型对径流产沙的影响,探究径流产沙及其与土地利用关系在黄土高原关键带类型的差异,为区域土地利用及植被恢复优化和水土保持功能提升提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 黄土高原关键带类型和径流产沙数据获取

根据地球关键带理论设计了黄土高原关键带类型分类框架,涉及地球多样性(Geodiversity)、生态系统、气候和人类社会因素四个方面,包含了24个关键带指标,以正六边形作为空间基本单元,采用主成分分析和聚类分析相结合的方法将黄土高原划分为8类关键带类型(图1),为研究年径流产沙的关键带类型分异提供宏观背景<sup>[8-9]</sup>。类型III是黄土丘陵农业-草地关键带,耕地和草地的面积比例高;类型IV是黄土丘陵沟壑农林草交错关键带,耕地面积比例最高,草地次之,林地也有较高的比例;类型VIII为风沙丘陵荒漠-草地关键带,草地面积最大,其中植被覆盖度和生态系统净初级生产力最低;类型VI是冲积平原农业-草地关键带,草地和耕地是最为主要的土地类型;类型I是山地森林关键带,林地和灌木的覆盖比例达80%以上;类型VII是高寒灌丛-草地关键带,草地和灌木为最主要的土地类型;类型II是冲积平原农业关键带,拥有70%以上的耕地面积,是8类关键带中最高的。类型V是城市关键带,人工地面、国内生产总值和人口密度最高。

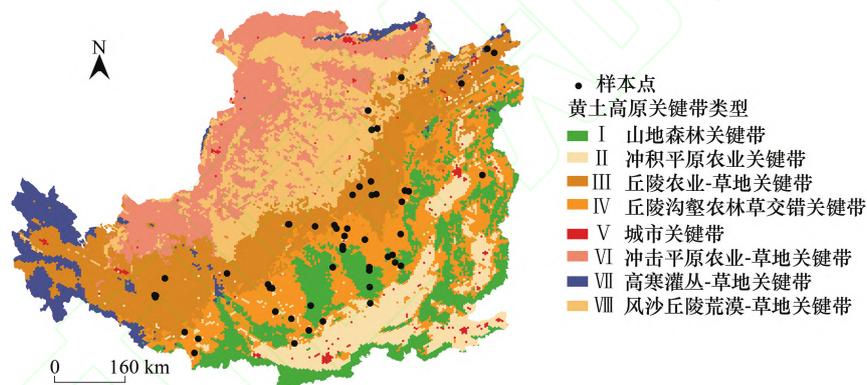


图1 黄土高原整合径流小区样点和关键带类型的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of critical zones and sampling points from meta-analysis of runoff plots on the Loess Plateau

在 Web of Science 文摘数据库和中国知网(CNKI)设置关键词检索了1990年1月至2017年10月的中英文文献,关键词如下:“Runoff”、“streamflow”、“discharge”、“water yield”、“water provision”和“soil erosion”、“sediment load”、“sediment delivery”、“sediment discharge”、“sediment yield \*”、“sediment \*”;“径流”或“产水”或“水供给”、“产沙”或者“产沙量”。然后通过“Loess Plateau”、“\* middle \* Yellow River”、“黄土高原”或“黄河中游”关键词进一步筛选。通过文献管理软件 EndNote X7 和 NoteExpress 2.0 进行中英文文献管理,去除重复,并根据筛选标准对标题、摘要和全文进行再次筛选,满足以下纳入标准:(1)径流小区个案研究分布于黄土高原区域;(2)径流小区试验在自然降雨条件下进行;(3)为坡面径流小区野外试验观测研究;(4)个案研究至少记录径流或产沙及其影响因素(如土地利用类型、径流小区面积、坡长和坡度等);(5)径流产沙均值、标准差或标准误或样本量文献全文中直接或间接报道。除了城市关键带V和冲积平原农业-草地关键带VI外,山地森林关键带I有8篇、冲积平原农业关键带II有4篇、黄土丘陵农业-草地关键带III有21篇、黄土丘陵沟壑农林草交错关键带IV有22篇、高寒灌丛-草地关键带有1篇、风沙丘陵荒漠-草地关键带VIII有3篇,共59篇文献纳入到本研究(图1)。Engauge Digitizer 软件用于扣取散点图、箱图和条形图中的数据,年径流和产沙通过生长季内所有降雨事件对应的径流和产沙求和,年径流量与年降雨量的比值计算年径流系数,

获取了 1121 条年径流产沙数据。

## 1.2 数据处理与统计分析

### 1.2.1 空间分异探测

地理分异探测是有效探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法,如分层地理分异探测软件 GeoDetector<sup>[25-26]</sup>。本文采用 GeoDetector 软件的 3 个探测器检验土地利用与关键带类型年径流和产沙关系的地理空间分层分异及其影响因子的识别。详细过程如下:

分异及因子探测是探测  $Y$  的空间分异性;以及探测某因子  $X$  多大程度上解释了属性  $Y$  的空间分异。用  $q$  值度量,表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST}$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SST = N \sigma^2$$

式中: $h=1, \dots, L$  为变量  $Y$  或因子  $X$  的分层(Strata),即黄土高原关键带类型(图 1); $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  和全区的单元数; $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别是层  $h$  和全区的  $Y$  值的方差,变量  $Y$  是年径流量或年径流系数或年产沙量,因子  $X$  为径流小区面积、坡长、坡度和土地利用等影响因素,下同。SSW 和 SST 分别为层内方差之和(Within Sum of Squares)和全区总方差(Total Sum of Squares)。 $q$  的值域为 $[0, 1]$ ,值越大说明  $Y$  的空间分异性越明显;如果分层是由自变量  $X$  生成的,则  $q$  值越大表示自变量  $X$  对属性  $Y$  的解释力越强,反之则越弱。极端情况下, $q$  值为 1 表明因子  $X$  完全控制了  $Y$  的空间分布, $q$  值为 0 则表明因子  $X$  与  $Y$  没有任何关系, $q$  值表示  $X$  解释了  $100 \times q\%$  的  $Y$ 。

$q$  值的一个简单变换满足非中心  $F$  分布:

$$F = \frac{N - L}{L - 1} \frac{q}{1 - q} F(L - 1; \lambda)$$

$$\lambda = \frac{1}{\sigma^2} \left[ \sum_{h=1}^L \bar{Y}_h^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{h=1}^L \sqrt{N_h} \bar{Y}_h \right)^2 \right]$$

式中: $\lambda$  为非中心参数; $\bar{Y}_h$  为层  $h$  的均值。由地理探测器软件来检验  $q$  值是否显著。

交互作用探测识别不同风险因子  $X_i$  之间的交互作用,即评估因子  $X_1$  和  $X_2$  共同作用时是否会增加或减弱对因变量  $Y$  的解释力,或这些因子对  $Y$  的影响是相互独立的。评估的方法是首先分别计算两种因子  $X_1$  和  $X_2$  对  $Y$  的  $q$  值: $q(X_1)$  和  $q(X_2)$ , 并且计算它们交互时的  $q$  值: $q(X_1 \cap X_2)$ , 并对  $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$  与  $q(X_1 \cap X_2)$  进行比较。探讨这些因素对年径流产沙的影响和解释强弱差异以及与关键带类型的交互作用类型。

生态探测用于比较两因子  $X_1$  和  $X_2$  对属性  $Y$  的空间分布的影响是否有显著的差异,以  $F$  统计量来衡量:

$$F = \frac{N_{X_1}(N_{X_2} - 1) SSW_{X_1}}{N_{X_2}(N_{X_1} - 1) SSW_{X_2}}$$

$$SSW_{X_1} = \sum_{h=1}^{L_1} N_h \sigma_h^2, SSW_{X_2} = \sum_{h=1}^{L_2} N_h \sigma_h^2$$

式中: $N_{X_1}$  及  $N_{X_2}$  分别表示两个因子  $X_1$  和  $X_2$  的样本量; $SSW_{X_1}$  和  $SSW_{X_2}$  分别表示由  $X_1$  和  $X_2$  形成的分层的层内方差之和; $L_1$  和  $L_2$  分别表示变量  $X_1$  和  $X_2$  分层数目。其中零假设  $H_0: SSW_{X_1} = SSW_{X_2}$ 。如果在  $\alpha=0.05$  的显著水平上拒绝  $H_0$ , 这表明两因子  $X_1$  和  $X_2$  对属性  $Y$  的空间分布的影响存在显著的差异。

### 1.2.2 统计分析

将径流和产沙数据都变换为统一的单位,径流单位为 mm,产沙单位为  $g/m^2$ 。土地利用类型包括人工草地(Artificial grassland, AG)、自然草地(Natural grassland, NG)、林地(Forest, F)、灌丛(Shrubland, S)、耕地(Cropland, C)、撂荒地(Abandoned land, AL)、裸地(Bareland, B)<sup>[14,17,20]</sup>。将径流小区面积、坡长和坡度特征

作为协变量,根据土地利用类型与关键带类型对年径流量、年径流系数和年产沙量进行描述性统计,并对原始数据 Box-Cox 正态变换和正态性检验,通过单因素方差分析 (ANOVA) 和多重比较 (Tukey's HSD) 研究径流小区和关键带类型对年径流产沙的影响,以及单一土地利用的年径流产沙在各关键带类型的差异性,箱图中不同的小写字母代表在 0.05 水平上存在显著性差异。数据变换、统计分析和图在 R 和 ArcGIS 10.3 软件制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用对年径流产沙的影响

考虑径流小区的面积、坡长、坡度和降雨作为协变量的方差分析显示,土地利用是影响黄土高原坡面水土流失的重要因素(图 2)。撂荒地、裸地和耕地年均径流量显著高于人工草地、自然草地、灌丛和林地 ( $P < 0.05$ ),撂荒地的年均径流量最高为 35.99 mm,灌丛和林地的年均径流量都较低。撂荒地、裸地的年均径流系数显著高于人工草地、自然草地、灌丛和林地,撂荒地最高为 20.23%,耕地年均径流系数也较高为 6.29% ( $P < 0.05$ )。同时,林地与灌丛的年均产沙量分别为 149.99 g/m<sup>2</sup> 和 559.75 g/m<sup>2</sup>,显著低于人工和自然草地,而撂荒地、裸地和耕地的年均产沙量较高,分别为 4208.82 g/m<sup>2</sup>、3036.88 g/m<sup>2</sup> 和 1178.35 g/m<sup>2</sup>,且裸地显著高于耕地 ( $P < 0.05$ )。

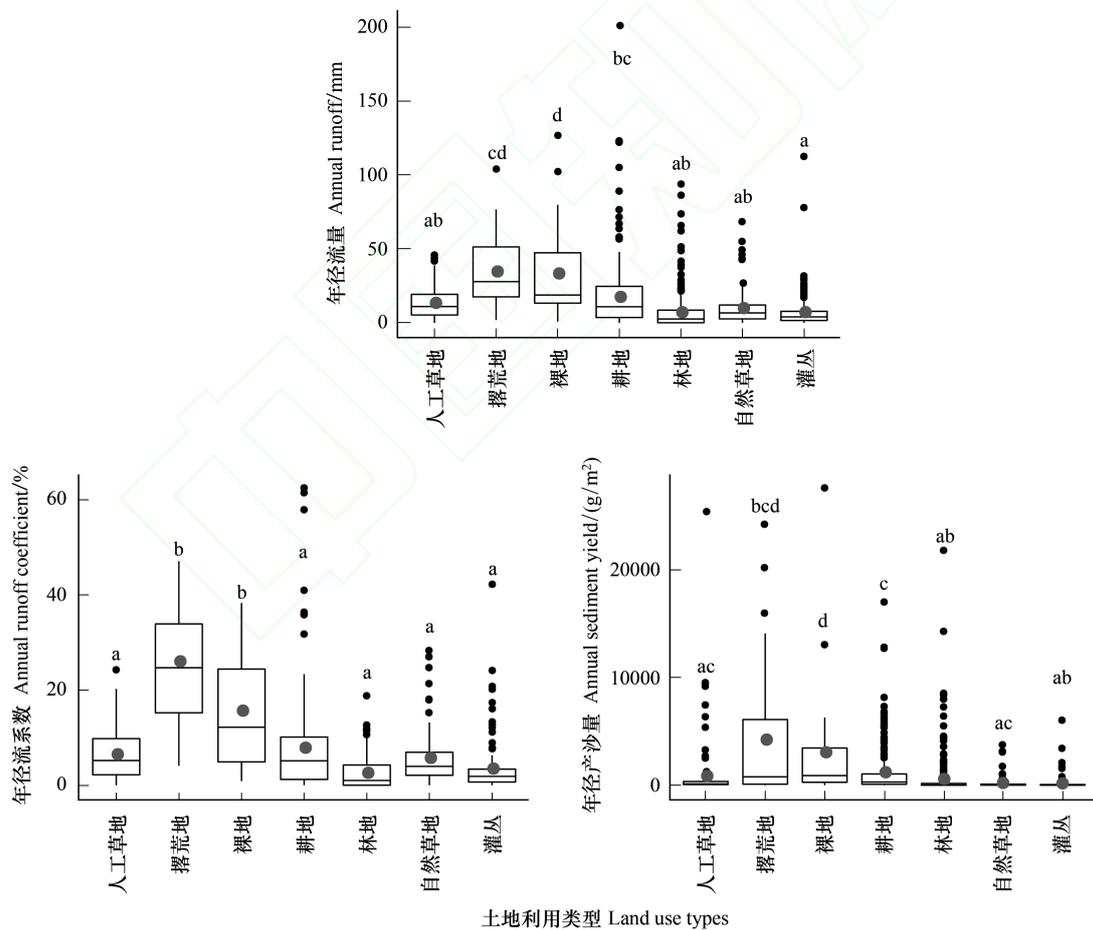


图 2 径流小区土地利用类型对年径流产沙的影响

Fig.2 The effect of land use types at the runoff plots on annual runoff and sediment yield

AG:人工草地 Artificial grassland; AL:撂荒地 Abandoned land; B:裸地 Bareland; C:耕地 Cropland; F:林地 Forest; NG:自然草地 Natural grassland; S:灌丛 Shrubland

## 2.2 年径流产沙及其与土地利用关联关系的关键带类型差异

冲积平原农业关键带 II 的年均径流量最高为 20.24 mm, 山地森林关键带 I 的年均径流量和径流系数最低分别为 3.94 mm 和 0.90%, 丘陵农业-草地关键带 III 与丘陵沟壑农林草交错关键带 IV 的年均径流量介于冲积平原农业关键带 II 和山地森林关键带 I 之间(图 3)。年均径流系数沿着冲积平原农业关键带 II、丘陵农业-草地关键带 III、丘陵沟壑农林草交错关键带 IV 和高寒灌丛-草地关键带 VII 呈显著增加趋势, 高寒灌丛-草地关键带 VII 最高为 16.90% ( $P < 0.05$ ) (图 3)。丘陵沟壑农林草交错关键带 IV 的年均产沙量最高为 1289.19  $\text{g}/\text{m}^2$ , 高寒灌丛-草地关键带 VII 的年均产沙量最低为 257.28  $\text{g}/\text{m}^2$ , 丘陵农业-草地关键带 III 和高寒灌丛-草地关键带 VII 的年均产沙量显著低于山地森林关键带 I、冲积平原农业关键带 II、丘陵沟壑农林草交错关键带 IV、风沙丘陵荒漠-草地关键带 VIII ( $P < 0.05$ ) (图 3)。

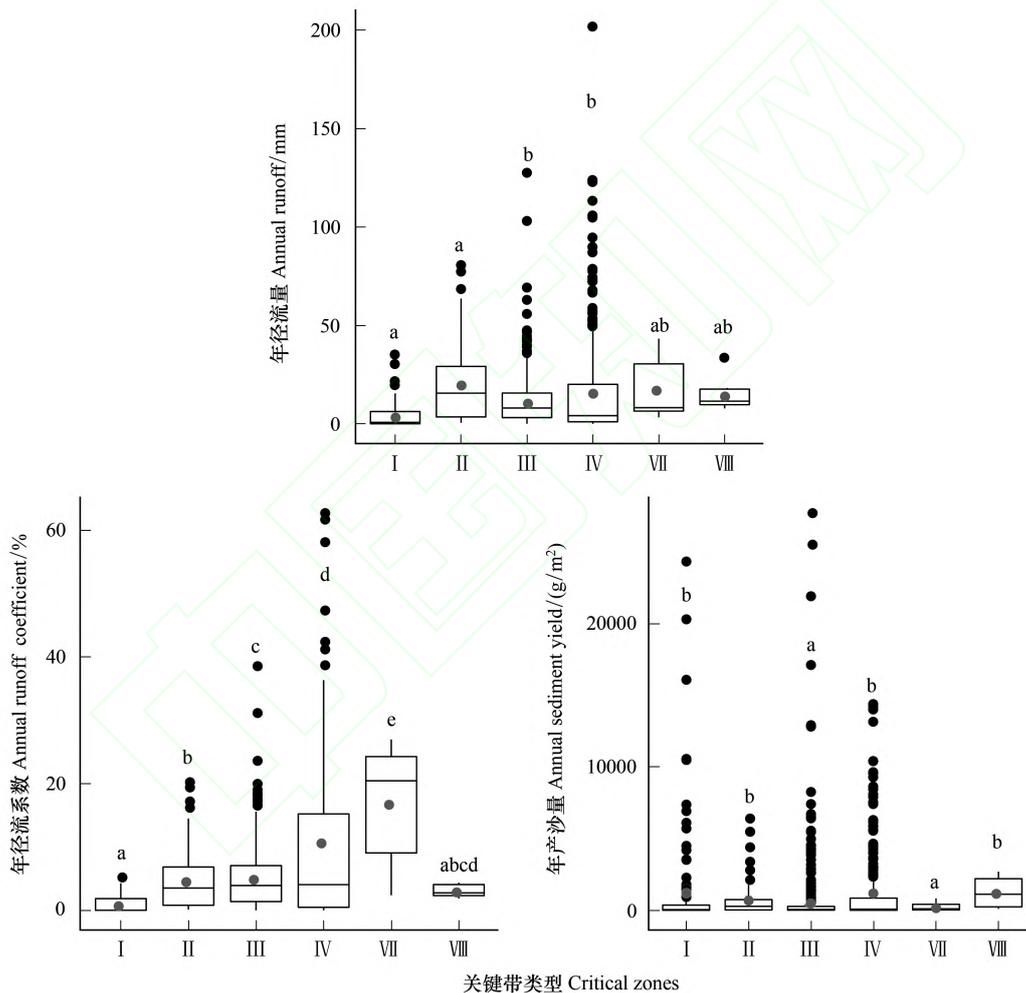


图 3 关键带类型下年径流产沙特征

Fig.3 Characteristics of annual runoff and sediment yield under critical zones

除了撂荒地的年均产沙量在山地森林关键带 I (最高为 16240.40  $\text{g}/\text{m}^2$ ) 显著高于丘陵农业-草地关键带 III 和风沙丘陵荒漠-草地关键带 VIII 外, 丘陵沟壑农林草交错关键带 IV 的撂荒地年均径流量、径流系数和产沙量都显著高于其他关键带类型, 分别为 36.71 mm、28.7% 和 2576.42  $\text{g}/\text{m}^2$  ( $P < 0.05$ ) (图 4)。各关键带类型的裸地水土流失都较高, 丘陵农业-草地关键带 III 的年均径流量和产沙量最高分别为 48.81 mm 和 4163.78  $\text{g}/\text{m}^2$ , 而山地森林关键带 I 的裸地年均径流量和径流系数最低分别为 15.03 mm 和 4.10%, 裸地年均径流系数在丘陵沟壑农林草交错关键带 IV 最高为 35.88%, 在高寒灌丛-草地关键带 VII 最低为 454.72  $\text{g}/\text{m}^2$  ( $P < 0.05$ )

(图 4)。丘陵农业-草地关键带 III、丘陵沟壑农林草交错关键带 IV 的耕地年均径流量、径流系数和产沙量都较高,丘陵沟壑农林草交错关键带 IV 的耕地年均径流量和径流系数最高分别为 18.77 mm 和 35.88%,而冲积平原农业关键带 II 的耕地年均径流量和径流系数较高,其年均产沙量最低为 539.95 g/m<sup>2</sup> ( $P<0.05$ )。风沙丘陵荒漠-草地关键带 VIII 的耕地年均径流产沙较高,其年均产沙量最高为 2126.00 g/m<sup>2</sup>,山地森林关键带 I 的耕地年均径流量和径流系数最低分别为 6.34 mm 和 4.10% ( $P<0.05$ ) (图 4)。

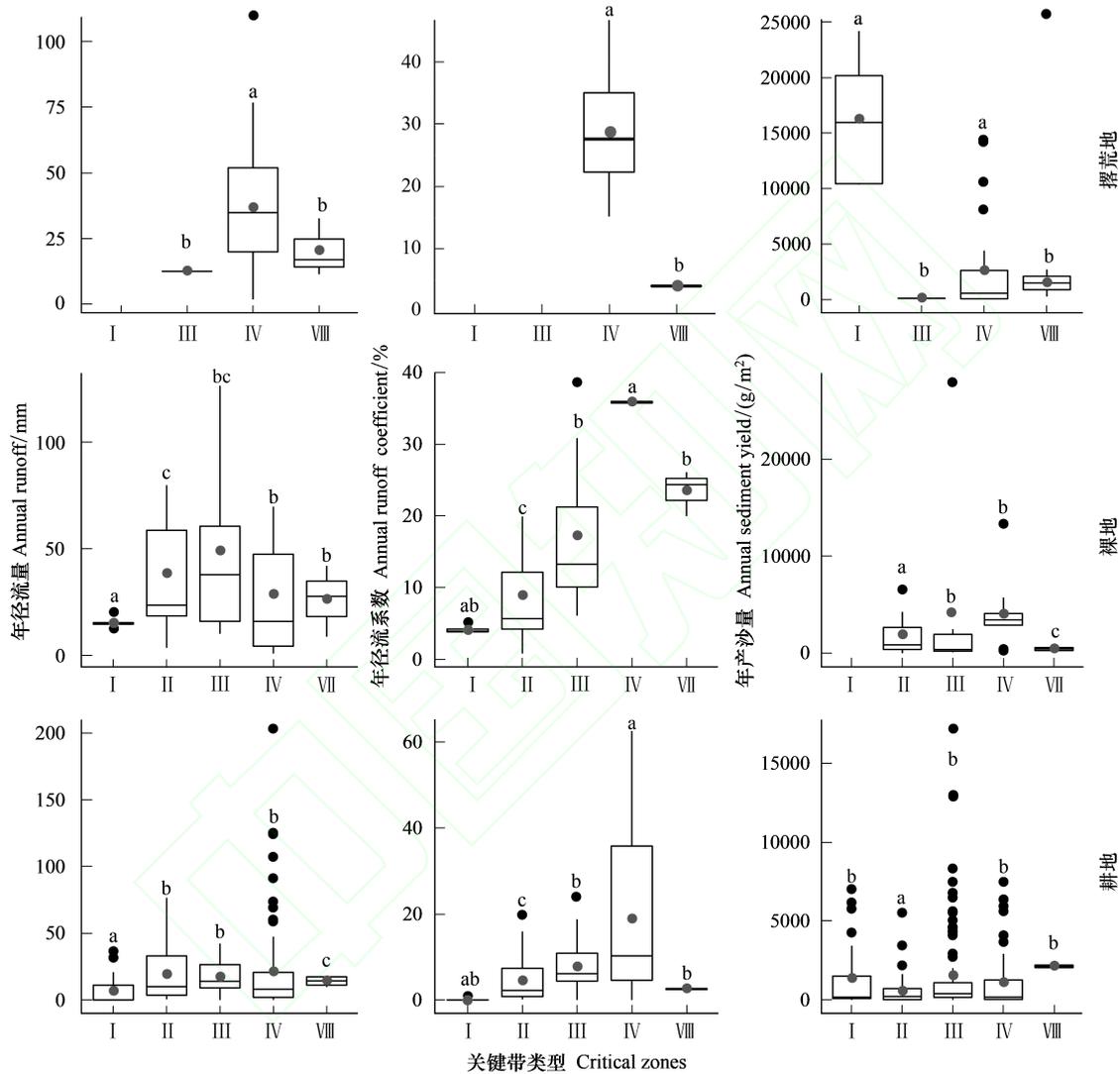


图 4 关键带类型下撂荒地、裸地和耕地的年径流产沙特征

Fig.4 Characteristics of annual runoff and sediment yield of abandoned land, bareland and cropland under critical zones

人工草地、自然草地、灌丛和林地有利于土壤保持,但是具有明显的关键带类型分异(图 5)。高寒灌丛-草地关键带 VII 的人工草地年均径流量和径流系数较高分别为 16.46 mm 和 15.61%,但是其年均产沙最低为 302.20 g/m<sup>2</sup>,冲积平原农业关键带 II 的人工草地年均径流量和径流系数最低分别为 10.37 mm 和 2.40%,而人工草地年均径流系数在丘陵农业-草地关键带 III 显著高于其余关键带类型,人工草地年均产沙量在丘陵沟壑农林草交错关键带 IV 最高为 2549.94 g/m<sup>2</sup>,且显著高于其他关键带类型( $P<0.05$ ) (图 5)。高寒灌丛-草地关键带 VII 的自然草地年均径流量和径流系数都最高分别为 18.33 mm 和 17.09%,其年均产沙量也较高,而丘陵沟壑农林草交错关键带 IV 的自然草地年均径流量最低为 6.90 mm,丘陵农业-草地关键带 III 的自然草地年均径流系数显著高于丘陵沟壑农林草交错关键带 IV,山地森林关键带 I 的自然草地年均径流系数和产沙量最

低分别为 3.33% 和 35.18 g/m<sup>2</sup>, 风沙丘陵荒漠-草地关键带 VIII 的自然草地年均产沙量最高为 233.00 g/m<sup>2</sup> (图 5)。丘陵沟壑农林草交错关键带 IV 的灌丛年均径流量和产沙量最高分别为 10.47 mm 和 283.62 g/m<sup>2</sup>, 显著高于其他关键带类型, 而山地森林关键带 I 的灌丛年均径流系数和产沙量最低分别为 1.84% 和 3.12 g/m<sup>2</sup>, 高寒灌丛-草地关键带 VII 的灌丛年均径流系数最高为 11.40% (图 5)。山地森林关键带 I 的林地年均径流量、径流系数和产沙量最低分别为 1.56 mm、0.41% 和 307.36 g/m<sup>2</sup>, 而林地年均径流量和径流系数在丘陵沟壑农林草交错关键带 IV 和丘陵农业-草地关键带 III 显著高于其他关键带类型, 丘陵沟壑农林草交错关键带 IV 的林地年均产沙显著高于其他关键带类型 ( $P < 0.05$ ) (图 5)。

### 2.3 年径流产沙的关键带类型分异探测及其影响因子

年径流量、径流系数和产沙量的关键带类型空间分异显著, 其中土地利用显著影响年径流量, 土地利用和坡度对年径流系数也有显著影响, 土地利用、小区面积、坡长和坡度是年均产沙量的重要影响因子 ( $P < 0.05$ ) (表 1)。

表 1 关键带类型下年径流产沙的分异及其因子探测

Table 1 The deviation and factor detecting of annual runoff and sediment yield under critical zones

变量 Variables	评估项 Evaluation item	关键带类型 Critical zones	土地利用 Land use	面积 Area	坡长 Slope length	坡度 Slope gradient
年径流量 Annual runoff	$q$ 统计值	0.37	0.30	0.02	0.02	0.04
	$P$ 值	0.00	0.00	0.25	0.25	0.10
年径流系数 Annual runoff coefficient	$q$ 统计值	0.00	0.24	0.00	0.00	0.05
	$P$ 值	0.00	0.00	0.60	0.64	0.00
年产沙量 Annual sediment yield	$q$ 统计值	0.77	0.07	0.61	0.62	0.62
	$P$ 值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

在年径流产沙地理分异解释中关键带类型与土地利用、径流小区特征(面积、坡长和坡度)对年径流产沙的解释都呈现出非线性增强关系, 面积和土地利用呈现双因子增强关系影响年径流量和径流系数, 这些因子在关键带类型解释年径流产沙的地理分异时存在非线性作用关系, 且考虑多种因素更有利于解释其空间分异, 说明年径流产沙地理分异解释具有明显的复杂性(表 2)。

表 2 关键带类型下年径流产沙的因子交互作用类型

Table 2 The type of factor interaction of annual runoff and sediment yield under critical zones

变量 Variables	因子 Factor	关键带类型 Critical zones	土地利用 Land use	面积 Area	坡长 Slope length	坡度 Slope gradient
年径流量 Annual runoff	关键带类型					
	土地利用	非线性增强				
	面积	非线性增强	双因子增强			
	坡长	非线性增强	非线性增强	非线性增强		
	坡度	非线性增强	非线性增强	非线性增强	非线性增强	
年径流系数 Annual runoff coefficient	关键带类型					
	土地利用	非线性增强				
	面积	非线性增强	双因子增强			
	坡长	非线性增强	非线性增强	非线性增强		
	坡度	非线性增强	非线性增强	非线性增强	非线性增强	
年产沙量 Annual sediment yield	关键带类型					
	土地利用	非线性增强				
	面积	非线性增强	非线性增强			
	坡长	非线性增强	非线性增强	非线性增强		
	坡度	非线性增强	非线性增强	非线性增强	双因子增强	

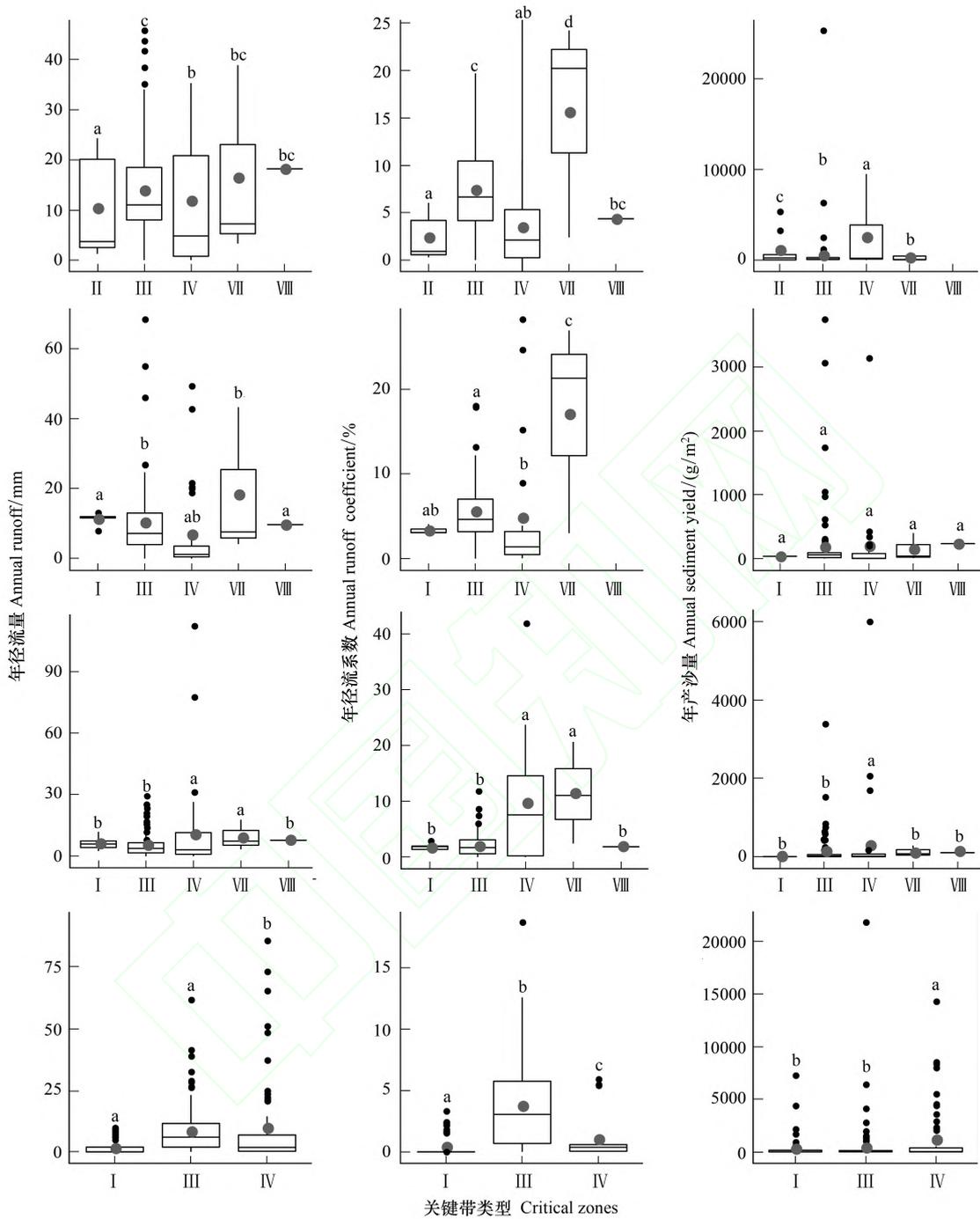


图5 关键带类型下人工草地、自然草地、灌丛和林地的年径流产沙特征

Fig.5 Characteristics of annual runoff and sediment yield of artificial grassland, natural grassland, shrubland and forest under critical zones

生态探测结果表明土地利用、面积、坡长和坡度对年径流产沙影响显著高于关键带类型的影响,说明径流小区样地特征是影响年径流产沙的首要要素,其次是关键带类型对年径流产沙空间分异的影响,即局地因素比地理分异特征对径流小区产流产沙的影响更显著(表3)。

表 3 关键带类型下年径流产沙的生态探测

Table 3 The ecological detector of annual runoff and sediment yield under critical zones

变量 Variables	因子 Factor	关键带类型 Critical zones	土地利用 Land use	面积 Area	坡长 Slope length	坡度 Slope gradient
年径流量 Annual runoff	关键带类型					
	土地利用	Y				
	面积	Y	N			
	坡长	Y	N	N		
	坡度	Y	N	N	N	
年径流系数 Annual runoff coefficient	关键带类型					
	土地利用	Y				
	面积	Y	N			
	坡长	Y	N	N		
	坡度	Y	N	N	N	
年产沙量 Annual sediment yield	关键带类型					
	土地利用	Y				
	面积	Y	Y			
	坡长	Y	Y	N		
	坡度	Y	Y	N		N

当  $Y(X_1)$  (行名风险因子) 显著高于  $Y(X_2)$  (列名风险因子) 则显示值“Y”, 相反则是“N”。 $F$  统计测试的显著水平为 0.05

### 3 讨论

覆有林、灌和草的土地利用比其他土地利用类型更有利于水土保持。在全球范围内, 林地、标准小区的年均径流系数最高, 而草地在微型小区的年均径流系数最低; 休耕地在标准小区尺度的年均径流系数最低, 林地、灌丛和草地的年均产沙量显著低于耕地、休耕地或撂荒地, 而休耕地的年均产沙量最高 ( $4299.10 \text{ g/m}^2$ )<sup>[19-20]</sup>。中西欧地区径流小区观测显示(半)自然植被覆盖的年均径流系数和产沙量最低, 其他土地利用类型的年均径流系数和产沙量从低到高依次为休耕地、耕地和裸地, 黄土高原的撂荒地、裸地和耕地年均径流量显著高于中西欧<sup>[14]</sup>。在湿润热带区域林地的年均产沙量最低 ( $10.7 \text{ g/m}^2$ ), 其他土地利用类型从低到高的顺序是灌丛、草地、耕地和裸地<sup>[15]</sup>。由于植被稀疏、疏松土壤、缺乏地膜覆盖等因素使撂荒地有较高的年径流量, 黄土高原撂荒地的年均径流系数(约 20%) 显著高于全球样地尺度休耕地的年均径流系数 (15.7%), 这证实了未管理的撂荒地不利于水分的保持<sup>[20,27-28]</sup>。尽管撂荒地是通过自然演替来恢复生态功能和保护生物多样性的土地利用类型<sup>[29-31]</sup>, 但是未管理和早期恢复阶段的撂荒地有较高的年产沙量, 甚至超过耕地的年产沙量<sup>[14,20,27-28]</sup>。本研究也发现黄土高原人工草地、林地、自然草地和灌丛的年径流量和产沙量显著低于其他土地利用类型, 且早期撂荒地、耕地和裸地不利于土壤保持。

由于整合数据的土地利用类型在各关键带类型分布不均, 本研究仅揭示了年径流产沙在部分关键带类型的差异, 且与土地利用类型密切相关, 也间接验证了黄土高原关键带类型分类的合理性。气候、地貌、植被和土壤等因素的长期演化反映了不同的关键带类型特征和关键过程, 冲积平原农业关键带、丘陵农业-草地关键带、丘陵沟壑农林草交错关键带和风沙丘陵荒漠-草地关键带与由东南向西北的植被、生态地理分区有较好的一致性<sup>[32-33]</sup>。土地利用类型与径流产沙关系的关键带类型分异受植被覆盖和地形影响显著, 丘陵农业-草地关键带和丘陵沟壑农林草交错关键带主要分布于黄土高原典型的黄土丘陵沟壑和黄土塬区域, 其地形陡峭和黄土集中分布, 使这两类关键带类型各土地利用类型具有较高的径流量和产沙量, 特别是耕地和裸地, 植被缺乏的裸地和撂荒地, 在各关键带类型的水土流失都较高, 山地森林关键带高的植被覆盖使林地、灌丛和草地有利于水源涵养和土壤保持<sup>[34-37]</sup>。黄土高原植被恢复后水供给和土壤保持之间存在显著的权衡, 特别是山地森林关键带的灌丛和林地, 而自然草地是平衡水供给和土壤保持最优的土地利用类型, 与本研究各关键带

类型的自然草地径流泥沙研究结果一致<sup>[38-40]</sup>。由于气候(如年均降雨和年均温)、试验观测的空间尺度(如微型小区、标准小区和流域等)的空间异质性决定了区域和全球尺度年径流产沙的空间分异<sup>[41]</sup>。黄土高原的黄土分布最广、厚度最深、侵蚀性最强<sup>[42]</sup>,复杂的黄土地貌<sup>[43]</sup>,大量水土保持措施和生态恢复工程的实施使黄土高原成为植被恢复最为明显的区域,显著减少了水土流失<sup>[44-45]</sup>。而径流小区背景特征是定量解释土地利用类型对径流和产沙效应的重要因素,如径流小区土壤、小区面积、坡长、坡度和降雨特征等<sup>[46-48]</sup>,土地利用和径流小区局地特征直接决定土壤抗侵蚀性的空间异质性,从而影响水土保持效益的空间分异,且各因素不是单一起作用或线性作用,而是多个因子联合或非线性关系才能解释区域以植被恢复为主管理措施对径流和产沙的空间分异<sup>[49-50]</sup>。因此在研究基于试验观测径流产沙的空间分异时需要更加综合的研究方法,如结构方程模型<sup>[51]</sup>和多种模型集成分析<sup>[52-53]</sup>。

#### 4 结论

通过整合黄土高原近 20 年野外径流实验小区的个案研究,对黄土高原土地利用与年径流产沙关系的关键带类型分异及其影响因素进行了探讨,为黄土高原区域水土保持措施实施与管理提供支撑。得出如下结论:

(1)人工草地、林地、自然草地和灌丛可以有效减少径流和保持土壤,早期撂荒地、裸地和耕地不利于水土保持。

(2)灌丛、林地、自然草地在山地森林关键带有利于水土保持,而丘陵沟壑农林草交错关键带仅有自然草地的水土保持效果较好,自然草地和人工草地在高寒灌丛-草地关键带有利于径流供给和保持土壤,撂荒地、裸地和耕地在丘陵农业-草地关键带和丘陵沟壑农林草交错关键带最不利于水土保持。

(3)以关键带类型作为分层因子的地理分异探测表明坡面径流小区的土地利用、面积、坡度、坡长等局地特征是影响径流产沙空间分异的首要因素,且在解释年径流产沙的关键带类型分异时呈现多因子互作、非线性增强的关系。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] National Research Council. Basic Research Opportunities in Earth Science. Washington, DC: The National Academies Press, 2001.
- [ 2 ] Grant G E, Dietrich W E. The frontier beneath our feet. *Water Resources Research*, 2017, 53(4): 2605-2609.
- [ 3 ] Reid W V, Chen D, Goldfarb L, Hackmann H, Lee Y T, Mokhele K, Ostrom E, Raivio K, Rockström J, Schellnhuber H J, Whyte A. Earth system science for global sustainability: grand challenges. *Science*, 2010, 330(6006): 916-917.
- [ 4 ] 安培浚, 张志强, 王立伟. 地球关键带的研究进展. *地球科学进展*, 2016, 31(12): 1228-1234.
- [ 5 ] Guo L, Lin H. Critical Zone research and observatories: current status and future perspectives. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(9): 1-14.
- [ 6 ] Brantley S L, Dibiase R A, Russo T A, Shi Y N, Lin H, Davis K J, Kaye M, Hill L, Kaye J, Eissenstat D M, Hoagland B, Dere A L, Neal A L, Brubaker K M, Arthur D K. Designing a suite of measurements to understand the critical zone. *Earth Surface Dynamics*, 2016, 4(1): 211-235.
- [ 7 ] Sullivan P L, Wymore A S, McDowell W H, Aarons S, Aciego S, Anders A M, Anderson S, Aronson E, Arvin L, Bales R, Berhe A A, Billings S, Brantley S L, Brooks P, Carey C, Chorover J, Comas X, Covington M, Dere A, Derry L, Dietrich W E, Druhan J, Fryar A, Giesbrecht I, Groffman P, Hall S, Harman C, Hart S, Hayes J, Herndon E, Hirmas D, Karwan D, Kinsman-Costello L, Kumar P, Li L, Lohse K, Ma L, Macpherson G L, Marshall J, Martin J B, Miller A J, Moore J, Papnicolau T, Prado B, Reisinger A J, Richter D, Riebe C, Rempe D, Ward A, Ward D, West N, Welty C, White T, Yang W. New opportunities for Critical Zone science. Arlington, Virginia: 2017 CZO Arlington Meeting White Booklet, 2017: 27-28 [2021-01-20]. <https://czo-archive.criticalzone.org/sierra/publications/pub/sullivan-wymore-mcdowell-et-al-2017-new-opportunities-for-critical-zone-sci/>.
- [ 8 ] Lü Y H, Hu J, Fu B J, Harris P, Wu L H, Tong X L, Bai Y F, Comber A J. A framework for the regional critical zone classification: the case of the Chinese Loess Plateau. *National Science Review*, 2019, 6(1): 14-18.
- [ 9 ] 金钊, 王云强, 高光耀, 强小科, 蔡秋芳, 刘禹, 孙有斌, 吕一河, 傅伯杰, 安芷生. 地球关键带与地表通量综合观测研究为黄土高原生态保护和可持续发展提供有力的科技支撑. *中国科学院院刊*, 2020, 35(3): 378-387.
- [ 10 ] Montgomery D R. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*,

- 2007, 104(33): 13268-13272.
- [11] Zhuang Y H, Du C, Zhang L, Du Y, Li S S. Research trends and hotspots in soil erosion from 1932 to 2013: a literature review. *Scientometrics*, 2015, 105(2): 743-758.
- [12] Kinnell P I A. A review of the design and operation of runoff and soil loss plots. *CATENA*, 2016, 145: 257-265.
- [13] Boix-Fayos C, Martínez-Mena M, Arnau-Rosalén E, Calvo-Cases A, Castillo V, Albaladejo J. Measuring soil erosion by field plots: understanding the sources of variation. *Earth-Science Reviews*, 2006, 78(3/4): 267-285.
- [14] Maetens W, Vanmaercke M, Poesen J, Jankauskas B, Jankauskiene G, Ionita I. Effects of land use on annual runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean: a meta-analysis of plot data. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2012, 36(5): 599-653.
- [15] Cerdan O, Govers G, Le Bissonnais Y, Van Oost K, Poesen J, Saby N, Gobin A, Vacca A, Quinton J, Auerswald K, Klik A, Kwaad F J P M, Raclot D, Ionita I, Rejman J, Rousseva S, Muxart T, Roxo M J, Dostal T. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: a study based on erosion plot data. *Geomorphology*, 2010, 122(1/2): 167-177.
- [16] Labrière N, Locatelli B, Laumonier Y, Freycon V, Bernoux M. Soil erosion in the humid tropics: a systematic quantitative review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 203: 127-139.
- [17] Hu J, Lü Y H, Fu B J, Comber A J, Harris P. Quantifying the effect of ecological restoration on runoff and sediment yields: a meta-analysis for the Loess Plateau of China. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2017, 41(6): 753-774.
- [18] 赵跃中, 穆兴民, 严宝文, 赵广举. 黄土高原不同生长年限植被减水减沙效益整合分析. *水土保持通报*, 2015, 35(3): 6-11.
- [19] García-Ruiz J M, Beguería S, Nadal-Romero E, González-Hidalgo J C, Lana-Renault N, Sanjuán Y. A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*, 2015, 239: 160-173.
- [20] Mutema M, Chaplot V, Jewitt G, Chivenge P, Blöschl G. Annual water, sediment, nutrient, and organic carbon fluxes in river basins: a global meta-analysis as a function of scale. *Water Resources Research*, 2015, 51(11): 8949-8972.
- [21] Haregeweyn N, Tsunekawa A, Nyssen J, Poesen J, Tsubo M, Meshesha D T, Schütt B, Adgo E, Tegegne F. Soil erosion and conservation in Ethiopia: a review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2015, 39(6): 750-774.
- [22] Chen L D, Wei W, Fu B J, Lü Y H. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: review and perspective. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2007, 31(4): 389-403.
- [23] Viña A, McConnell W J, Yang H B, Xu Z C, Liu J G. Effects of conservation policy on China's forest recovery. *Science Advances*, 2016, 2(3): e1500965.
- [24] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, Shi W Y, Song Y, He X H. Balancing green and grain trade. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 739-741.
- [25] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [26] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 250-256.
- [27] Prosdocimi M, Tarolli P, Cerdà A. Mulching practices for reducing soil water erosion: a review. *Earth-Science Reviews*, 2016, 161: 191-203.
- [28] Lasanta T, García-Ruiz J M, Pérez-Rontomé C, Sancho-Marcén C. Runoff and sediment yield in a semi-arid environment: the effect of land management after farmland abandonment. *CATENA*, 2000, 38(4): 265-278.
- [29] Corlett R T. Restoration, reintroduction, and rewilding in a changing world. *Trends in Ecology & Evolution*, 2016, 31(6): 453-462.
- [30] Hou J, Fu B J, Liu Y, Lu N, Gao G Y, Zhou J. Ecological and hydrological response of farmlands abandoned for different lengths of time: evidence from the Loess Hill Slope of China. *Global and Planetary Change*, 2014, 113: 59-67.
- [31] Queiroz C, Beilin R, Folke C, Lindborg R. Farmland abandonment: threat or opportunity for biodiversity conservation? A global review. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(5): 288-296.
- [32] 张甜, 彭建, 刘焱序, 赵明月. 基于植被动态的黄土高原生态地理分区. *地理研究*, 2015, 34(9): 1643-1661.
- [33] 郑度. 中国生态地理区域系统研究. 北京: 商务印书馆, 2008: 1-30.
- [34] 黄秉维. 编制黄河中游流域土壤侵蚀分区图的经验教训. *科学通报*, 1955, (12): 15-21, 14-14.
- [35] 景可. 论黄河中游的侵蚀与地理环境的关系. *地理学与国土研究*, 1986, 2(1): 26-32.
- [36] 朱显谟, 孙林夫, 杨文治, 周佩华, 曹振东, 陈国良, 张淑光, 王玉, 邹厚远, 王德轩, 刘万铨, 巨仁, 杨小寅, 蒋定生. 黄土高原综合治理分区//中国科学院西北水土保持研究所集刊(黄土高原综合治理专集). 咸阳: 中国科学院水利部水土保持研究所, 1985: 2-66.
- [37] 王费新, 王兆印. 基于植被-侵蚀动力学的黄土高原分区及治理策略. *清华大学学报: 自然科学版*, 2007, 47(12): 2119-2122.
- [38] Liu Y F, Dunkerley D, López-Vicente M, Shi Z H, Wu G L. Trade-off between surface runoff and soil erosion during the implementation of ecological restoration programs in semiarid regions: a meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 136477.
- [39] Jiang C, Wang X C, Zhang H Y, Labzovskii L, Wang J, Liu T. Re-orienting ecological restoration in degraded drylands for a more sustainable soil-water relationship: non-linear boundary of limited water resources in combating soil loss. *Journal of Arid Environments*, 2019, 167: 87-100.
- [40] 张鸾, 赵利华. 晋北丘陵风沙区不同植被恢复模式的水土保持效应. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 107-111.

- [41] Wu G L, Liu Y F, Cui Z, Liu Y, Shi Z H, Yin R, Kardol P. Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(5): 875-885.
- [42] Laffan J M, Tian J L, Huang C H. *Soil Erosion and Dryland Farming*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2000.
- [43] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223-243.
- [44] Tsunekawa A, Liu G B, Yamanaka N, Du S. *Restoration and Development of the Degraded Loess Plateau, China*. Tokyo: Springer Japan, 2014.
- [45] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 侯建, 信忠保, 刘国华, 傅伯杰. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策. *生态学报*, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [46] Zhou J, Fu B J, Gao G Y, Lü Y H, Liu Y, Lü N, Wang S. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China. *CATENA*, 2016, 137: 1-11.
- [47] Wang L, Wei S P, Horton R, Shao M A. Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the Loess Plateau of China. *CATENA*, 2011, 87(1): 90-100.
- [48] Fu B J, Meng Q H, Qiu Y, Zhao W W, Zhang Q J, Davidson D A. Effects of land use on soil erosion and nitrogen loss in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(1): 87-96.
- [49] Geng R, Zhang G H, Li Z W, Wang H. Spatial variation in soil resistance to flowing water erosion along a regional transect in the Loess Plateau. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(15): 2049-2058.
- [50] Zhao J L, Yang Z Q, Govers G. Soil and water conservation measures reduce soil and water losses in China but not down to background levels: evidence from erosion plot data. *Geoderma*, 2019, 337: 729-741.
- [51] Zhou J, Fu B J, Yan D C, Lü Y H, Wang S, Gao G Y. Assessing the integrity of soil erosion in different patch covers in semi-arid environment. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 71-86.
- [52] Li P F, Mu X M, Holden J, Wu Y P, Irvine B, Wang F, Gao P, Zhao G J, Sun W Y. Comparison of soil erosion models used to study the Chinese Loess Plateau. *Earth-Science Reviews*, 2017, 170: 17-30.
- [53] Guo Y R, Peng C H, Zhu Q A, Wang M, Wang H, Peng S S, He H L. Modelling the impacts of climate and land use changes on soil water erosion: model applications, limitations and future challenges. *Journal of Environmental Management*, 2019, 250: 109403.