

DOI: 10.5846/stxb202005271364

李霞, 朱万泽, 舒树森, 盛哲良, 王文武. 基于主成分分析的大渡河中游干暖河谷草地土壤质量评价. 生态学报, 2021, 41(10): 3891-3900.

Li X, Zhu W Z, Shu S M, Sheng Z L, Wang W W. Soil quality assessment of grassland in dry and warm valley of Dadu River based on principal component analysis. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 3891-3900.

# 基于主成分分析的大渡河中游干暖河谷草地土壤质量评价

李霞<sup>1,2</sup>, 朱万泽<sup>1,\*</sup>, 舒树森<sup>1,2</sup>, 盛哲良<sup>1,2</sup>, 王文武<sup>1,2</sup>

1 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 草地在干暖河谷植被恢复及植物群落演替中具有重要作用, 而植被恢复的关键在于土壤质量。将大渡河干暖河谷泸定至汉源段, 依据坡向划分为 8 个方位(北、东北、东、东南、南、西南、西、西北), 分析了不同坡向和植被盖度草地的土壤理化性质, 采用主成分分析法(Principal component analysis, PCA)对河谷区草地土壤质量进行了评价。结果表明:(1)影响河谷草地土壤质量的最小数据集(Minimum data set, MDS)指标包括非毛管孔隙度、土壤容重、有机质和碳氮比;(2)河谷从东北坡过渡到西南坡土壤质量逐渐降低, 与南坡热而干旱的微气候使土壤矿化作用剧烈, 而北坡适宜的光热和水热条件更有利于土壤中钾和磷的释放有关;(3)植被盖度与土壤质量呈正相关关系, 随着草地植被盖度减少土壤质量逐渐降低。高植被盖度(>70%)土壤质量主要受非毛管孔隙度影响, 而低盖度草地(<30%)主要受土壤容重影响;(4)河谷区草地土壤质量指数中间值分布较多, 土壤肥力属于 2—4 级中等水平。大渡河干暖河谷区草地土壤质量较好, 潜在肥力水平较高, 有利于植物生长和植物群落正向演替, 是植被人工恢复的重点区域。

**关键词:** 大渡河干暖河谷; 草地; 土壤质量评价; 主成分分析法

## Soil quality assessment of grassland in dry and warm valley of Dadu River based on principal component analysis

LI Xia<sup>1,2</sup>, ZHU Wanze<sup>1,\*</sup>, SHU Shumiao<sup>1,2</sup>, SHENG Zheliang<sup>1,2</sup>, WANG Wenwu<sup>1,2</sup>

1 Institute of Mountain Hazards and environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China

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

**Abstract:** Grassland in the dry and warm valley of Dadu River plays an important role in vegetation coverage restoration and natural succession of plant communities, while soil quality plays a key part in vegetation restoration. In this study, we divided the slope direction into 8 types (North, Northeast, East, Southeast, South, Southwest, and Northwest) in the Luding-Hanyuan section of the dry warm valley of the Dadu River. The soil physical properties as well as the soil chemical properties of the grassland with different slope directions was analyzed, and the grass coverages with different slope directions of grassland was also investigated, furthermore, the soil quality of dry and warm valley of Dadu River was assessed by principal component analysis. The results show that the minimum data set affecting soil quality of dry and warm valley grassland are non-capillary porosity, soil bulk density, organic content and C / N ratio. In the dry warm valley of Dadu River, the soil quality gradually decreases from the northeast slope to the southwest slope due to the hot and dry

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFC0505104); 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所“一三五”方向性项目(SDS-135-1707)

**收稿日期:** 2020-05-27; **网络出版日期:** 2021-03-26

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzzhu@imde.ac.cn

microclimate, which leads to more intense soil mineralization. The stable sunshine time and appropriate water conditions on the north slope are advantageous to potassium and phosphorus release in the soil. There was a positive correlation between vegetation coverage and soil quality and soil quality decreased with the decreasing of vegetation coverage. The soil quality of high vegetation coverage ( $> 70\%$ ) is mainly affected by noncapillary porosity, while that of low and high coverage grassland ( $< 30\%$ ) is mainly affected by soil bulk density. The middle value of grassland soil quality index is more distributed in the dry and warm valley of Dadu River, and the soil fertility is in the middle level of 2—4. The soil quality of the grassland is better as a whole in the dry and warm valley of Dadu River, and potential in fertility of grassland is high, which is conducive to plant growth and positive succession of plant community.

**Key Words:** dry and warm valley of Dadu River; grassland; soil quality assessment; principal component analysis

大渡河干暖河谷位于我国西南山区青藏高原过渡带,生态环境脆弱,自然地质条件错综复杂。河谷区为自然灾害的多发地段,多高山峡谷,植被在河谷坡面上作断续带状分布,以灌丛、草丛或稀树灌木草丛为主,植物群落层次结构单一,外貌随干湿季节交替变化明显<sup>[1]</sup>。河谷两岸有大量裸露坡面,是泥石流、崩塌、滑坡等自然灾害物源的主要来源之一<sup>[2-3]</sup>,也是山区治理中最关键和最困难的一种特殊地域类型<sup>[1]</sup>。

坡面植被可减缓河流对河谷两岸的直接冲刷,稳定坡面泥石流和滑坡物源,在调节坡面水分、拦截泥沙、网络固结松散土体、维持和提高土壤质量等方面具有重要作用<sup>[4]</sup>。坡面植被恢复的理想方法是通过自然演替逐渐改善生态系统的微环境,由相对单一的植物群落逐渐恢复成为结构、组成和功能相对复杂的稳定群落<sup>[5]</sup>。干旱河谷植被恢复应从草地植被恢复入手<sup>[6]</sup>,草地具有生长快,对生存环境要求相对较低等优点,只要灌草丛覆盖度大于 60%,即可保护土壤免于侵蚀<sup>[7]</sup>,是快速增加坡面植被覆盖的有效措施,也是植被自然演替重要的一环。大渡河干暖河谷草地面积约 106.12 km<sup>2</sup>,为河谷区植被面积的 12.2%,是河谷区重要的植被类型<sup>[8]</sup>,其水土保持功能主要体现在显著地防止风力和水力侵蚀,此外,草地在截留降水、废弃物降解、营养元素循环和维持生物多样性等方面发挥着重要作用<sup>[9]</sup>,也是生物多样性和珍稀动植物物种保护的重要基地<sup>[10]</sup>。发挥草地生态功能对推进河谷区植被恢复、区域生态平衡维系及促进当地畜牧业发展具有重要的意义<sup>[9-10]</sup>。

西南干旱河谷植被恢复与重建的关键在于土壤质量的改善<sup>[11]</sup>。土壤质量作为土壤的一种固有属性,是土壤理化及生物学性质的综合反映,在维持生态系统生物生产力、保护环境质量和动植物健康等方面具有重要作用<sup>[12]</sup>,土壤质量优劣关系到生态恢复进程、演替方向以及整个生态系统稳定性<sup>[13]</sup>,直接影响河谷两岸植被恢复进程,土壤在植被恢复演替过程中的作用已受到广泛的关注<sup>[14]</sup>。坡向作为山地的主要地形因子之一,虽然相互间的距离较近,但不同坡向土壤含水量、土壤养分等生境因子变化剧烈<sup>[15]</sup>,并影响着相应的植被分布格局<sup>[16]</sup>。开展大渡河干暖河谷土壤质量评估,可为该区域植被恢复和生态系统功能的可持续性提供科学依据。

大渡河干暖河谷泸定到汉源段是地质灾害多发的中游河谷区,河谷土壤归属于黄红壤<sup>[17]</sup>,王良健等<sup>[18]</sup>依据该区域河谷土壤理化性质又将土壤归属于山地褐土和山原红壤。随着对土地可持续利用的日益重视,大渡河干暖河谷区土壤质量相关研究也逐渐深入,刘蔚等<sup>[19]</sup>分析了大渡河中游干旱河谷云南松凋落叶分解和土壤呼吸对降水增加的响应,发现土壤全氮、微生物碳和氮呈现湿季高、干季低的特征,而土壤硝态氮和铵态氮湿季低、干季高,土壤微生物碳与土壤全氮、硝态氮、铵态氮之间存在明显的相关关系。赵琳等<sup>[20]</sup>研究表明,海拔、坡度、坡向、微地形、土层厚度和土壤质地是大渡河干暖河谷区各立地类型的主要影响因子。但尚缺乏针对大渡河干暖河谷区草地土壤质量的研究报道,鉴于其在大渡河干暖河谷植被恢复及植物群落演替中具有重要作用,本研究从分析大渡河干暖河谷不同坡向类型和植被盖度的草地土壤理化学性质入手,采用主成分分析法评价了河谷区草地土壤质量,分析了河谷坡向和草地植被盖度与土壤质量的关系,研究可为川西干暖河谷土壤管理和植被恢复提供科学依据。

## 1 材料与方方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于大渡河中游泸定至汉源干暖河谷区,地理位置 102°13'E—102°45'E, 29°14'N—29°82'N, 平均海拔 1300 m。流经长度 152.4 km, 属北亚热带季风气候, 干湿季明显, 年均气温 16.9℃, 年均降水量 801.3 mm, 降雨多集中于 6—9 月, 约占全年降水量的 82.2%<sup>[21]</sup>。该区域植被群落以灌草为主, 根据 LANDSAT-TM、HJ 卫星遥感数据, 采用混合分类法对研究区进行土地利用类型提取, 并对天然植被面积和草地面积分析显示, 草地约占区域内天然植被面积的 10.03%, 灌丛主要有多花胡枝子 (*Lespedeza floribunda*)、羊蹄甲 (*Bauhinia brachycarpa*)、车桑子 (*Dodonaea viscosa*) 等旱生河谷灌丛, 草主要有薹草 (*Carex spp*)、白茅 (*Imperata cylindrica*)、黄茅 (*Heteropogon coniorius*)、鬼针草 (*Bidens pilosa*)、芸香草 (*Cymbopogon distans*)、黄背草 (*Themeda triandra var. japonica*) 等种类, 同时也分布有以云南松 (*Pinus yunnanensis*) 及栎类为主的次生针叶林或针阔混交林。该区域土壤主要由砂页岩发育而来, 代表性土壤从下到上的垂直序列为褐土—棕壤—暗棕壤, 土壤质地轻壤至重壤土, 岩性松散, 土层浅薄且砾石含量大。

### 1.2 野外土壤样品采集

于 2018 年 9 月和 2019 年 9 月分别进行了两次土壤样品采集, 沿大渡河流域泸定至汉源干暖河谷, 将整个河谷坡面依据坡向划为 8 个方位(北、东北、东、东南、南、西南、西、西北), 在每个坡向根据植被盖度随机设置 5 m × 5 m 的草本研究样地, 将每个样地分为 9 个网格, 每个网格顺序编号后利用抽签的方法随机抽取 3 个网格作为样点, 采集样点表层 0—20 cm 土壤样品, 将同一样地内的 3 个样点土壤混合作为该样地土壤样品, 共采集了 102 个样品。其中, 植被盖度 < 30% 的样地 12 个, 植被盖度为 30%—50% 的样地 33 个, 植被盖度为 50%—70% 的样地 48 个, 植被盖度 > 70% 的样地 9 个, 在相同剖面相应深度处用 100 cm<sup>3</sup> 的环刀采集土壤样品, 土壤样品收集到自封袋中, 带回实验室进行土壤物理化学性质分析。

### 1.3 土壤理化性质测定

土壤物理性质测定: 土壤砾石含量、容重、最大持水量、最小持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、毛管持水量、土壤通气度和土壤排水能力等采用环刀法测定, 土壤含水量采用铝盒法测定。

土壤化学性质测定: 土壤 pH 值采用 1:2.5 电位法, 土壤全碳、全氮采用元素分析仪 (Elementar vario MACRO cube, Germany) 测定; 全钾采用氢氧化钠融化法, 全磷采用氢氧化钠碱熔—钼锑抗比色法, 有效磷采用碳酸氢钠法, 速效钾采用乙酸铵提取法<sup>[22]</sup>。

### 1.4 主成分分析

#### (1) 最小数据集 (MDS) 构建

主成分分析 (PCA) 可将土壤指标的数量减少到有限的一组向量中, 包含若干关键指标, 这些指标反映了土壤主要生态功能<sup>[23]</sup>。通过 PCA 确定影响土壤质量的最小数据集 (MDS), 可在一定程度上通过数据筛选, 减少参评土壤指标的数量, 解决了数据冗余的问题。PCA 选择对样本总方差的解释力大于 5% 的主成分, 在所有主成分组别中, 只将具有较大特征值的指标保留至 MDS 中<sup>[24]</sup>。为了避免数据冗长以及信息丢失的问题, 通过计算变量的 Norm 值 (矢量常模) 的方法来克服此缺陷, 当一个组别中存在大量的土壤指标, 并且这些土壤指标都具有代表性时, 则选择具有最大 Norm 值的指标, Norm 值的计算公式为<sup>[25]</sup>:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_1^k (u_{ik}^2 \cdot \lambda_k)} \quad (1)$$

式中,  $N_{ik}$  为第  $i$  个变量在特征值  $\geq 1$  的前  $k$  个主成分上的综合荷载;  $u_{ik}$  为第  $i$  个变量在第  $k$  个主成分上的荷载, 反映了第  $i$  个变量在第  $k$  个主成分的相对重要性;  $\lambda_k$  是第  $k$  个主成分的特征值。

选出 PCA 分析特征值  $\geq 1$  且主成分中因子荷载绝对值  $\geq 0.5$  的土壤指标分为一组, 若出现土壤指标同时在两个主成分中的因子荷载值都  $\geq 0.5$  的情况, 则进行指标间相关性分析, 将相应土壤指标归并到与其他

土壤指标相关性较低的那一组<sup>[26]</sup>。土壤指标间的相关性越好,表明土壤指标的作用效果相近,相关性较高的土壤指标只有一个可以入选 MDS,其余将被剔除<sup>[27]</sup>。

### 1.5 土壤质量进行评价

将确定的 MDS 各指标数值标准化处理为 0—1 的无量纲值,再根据各指标公因子方差通过式(2)计算其相应权重:

$$W_i = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^n c_i} \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad (2)$$

式中,  $W_i$  为指标权重;  $C_i$  为该指标公因子方差;  $n$  为最小数据集指标数。

最后, 指标得分通过式(3)被整合为一个综合指数, 即土壤质量指数(SQI)<sup>[27]</sup>:

$$Q_i = \sum_{i=1}^n W_i \cdot C_{ij} \quad i = 1, 2, 3 \dots n; j = 1, 2, 3, \dots m \quad (3)$$

式中,  $Q_i$  为评价对象的质量指数;  $W_i$  为第  $i$  个评价指标的权重;  $C_{ij}$  为评价对象  $i$  在第  $j$  个评价指标的值(无量纲值), 其中  $n = 9$ ,  $m$  由各植被类型所采集土壤样品数而定。

利用 SPSS 16.0 软件的 Descriptive Statistics 进行最大值、最小值、平均值、标准差、变异系数分析, 利用 Factor Analysis 进行相关性分析、主成分分析, 土壤指标的相关性分析检验在 0.05 或 0.01 显著性水平上进行, 图表绘制使用 Origin 和 Excel 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤理化性质

土壤物理化学性质是反映土壤综合质量的重要指标。大渡河干暖河谷区草地土壤理化性质分析显示(表 1), 土壤 pH 值在 5.380—8.780 之间, 变异系数最小, 其中弱碱性样地占样地总数的 75%, 弱酸性样地占 25%, 研究区土壤以弱碱性为主; 土壤有效磷变异系数大于 1, 为强变异指标, 说明该区域草地土壤有效磷具有强烈的空间异质性, 其余土壤理化指标变异系数均在 0.1—1 的范围内, 属于中等变异。整体来看, 研究区土壤理化性质在中等变异范围内。

表 1 土壤指标的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of basic soil indicators

土壤指标 Soil indicators	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation
砾石含量 Gravel content/%	0.01	0.9	0.28	0.246	0.867
容重 Soil bulk density/(g/cm <sup>3</sup> )	0.01	1.45	0.43	0.372	0.867
土壤含水量 Soil water content/(g/kg)	27.29	360.44	121.66	71.814	0.590
非毛管孔隙度(体积%) Non capillary porosity (Volume%)	3.55	37.79	15.60	5.337	0.342
毛管孔隙度(体积%) Capillary porosity (Volume%)	7.28	59.92	25.12	11.575	0.461
全氮 Total nitrogen content/(g/kg)	0.22	5.62	1.61	0.995	0.616
有机质 Organic content/(g/kg)	5.00	132.95	38.43	24.263	0.631
碳氮比 C/N ratio	4.37	69.56	16.71	12.079	0.723
pH 值 pH Value	5.38	8.78	7.90	0.880	0.111
速效钾 Available potassium content/(mg/kg)	19.70	812.14	125.86	99.929	0.794
有效磷 Available phosphorus content/(mg/kg)	2.50	137.20	16.43	30.371	1.849
全磷 Total phosphorus content/(mg/kg)	141.95	992.58	462.95	207.988	0.449
全钾 Total potassium content/(g/kg)	6.81	49.98	22.85	8.191	0.358

## 2.2 最小数据集( Minimum data set, MDS)的确定

基于 13 个土壤理化指标的主成分分析结果见表 2,表中列出 PCA 分析所得 4 组主成分特征值均大于 1,解释了研究区理化指标对土壤质量影响的 77.37%。土壤质量指标的公因子方差分析表明,4 组主成分能解释土壤有机质 90%以上的差异,砾石含量、容重、土壤含水量、毛管孔隙度、全氮、碳氮比、速效钾和速效磷 80%以上的差异,非毛管孔隙度、pH 值、全钾及全磷约 70%的差异(表 2)。选择各主成分组荷载因子绝对值  $\geq 0.5$  的指标组成 4 组主成分分析 MDS 备选指标,其中,第 1 组包括砾石含量、有机质、速效钾、全磷和全钾;第 2 组包括土壤含水量、碳氮比和有效磷;第 3 组包括毛管孔隙度和非毛管孔隙度;第 4 组包括容重和全氮。

表 2 土壤指标主成分分析的结果及公因子方差和分组

Table 2 Results of principal component analysis of the soil indicators and their Norm value and groups

土壤指标 Soil indicators	主成分 Principal components				Norm 值 Norm value	公因子方差 Communalities	分组 Group
	1	2	3	4			
砾石含量 Gravel content	0.697	-0.402	0.077	-0.076	1.527	0.82	1
容重 Soil bulk density	-0.120	-0.073	0.503	-0.649	1.087	0.845	4
土壤含水率 Soil moisture content	0.630	-0.567	-0.031	0.285	1.570	0.807	2
非毛管孔隙度 Non capillary porosity	-0.345	-0.343	0.686	-0.101	1.305	0.747	3
毛管孔隙度 Capillary porosity	-0.026	0.132	0.881	0.241	1.292	0.894	3
全氮 Total nitrogen content	0.301	0.633	0.096	0.561	1.338	0.882	4
有机质 Organic content	0.760	0.131	0.211	0.184	1.570	0.906	1
碳氮比	0.507	0.715	0.168	-0.119	1.524	0.846	2
pH 值 pH Value	-0.470	0.020	-0.236	-0.132	1.007	0.719	
速效钾 Available potassium content	-0.527	-0.112	-0.155	0.553	1.272	0.837	1
有效磷 Available phosphorus content	-0.218	0.533	-0.455	-0.313	1.193	0.877	2
全磷 Total phosphorus content	-0.630	0.492	0.243	0.122	1.515	0.696	1
全钾 Total potassium content	-0.750	0.185	0.224	0.097	1.552	0.73	1
特征值 Eigen values	3.965	2.397	1.988	1.442			
解释度 Explantation	32.120	17.530	14.520	13.200			
累积解释度 Explained variation	32.12	49.65	64.17	77.37			

Pearson 相关性显著的土壤指标中仅一个可入选 MDS,其余被剔除,如果一个指标与其他指标间高度加权的相关不显著,则保留为最小数据集。在分组 1、3 中,分别将 Norm 值最大的有机质和非毛管孔隙度纳入 MDS;在分组 2 中,土壤含水量 Norm 值大于碳氮比和有效磷,但碳氮比与土壤各指标相关性小于土壤含水量和有效磷,因此,选择碳氮比进入 MDS,以同样的方法将分组 4 中的容重纳入 MDS。最终确定的大渡河干暖河谷草地土壤质量 MDS 包含土壤非毛管孔隙度、容重、有机质和碳氮比等 4 个指标。

通常干旱河谷、干暖河谷植被状态的主要限制因素是土壤水分条件,但水分含量与土壤容重显著相关 ( $P < 0.1$ ),根据显著相关的指标选择 Norm 值最大的指标归入 MSD 的原则,本文土壤含水量没有纳入 MSD 中,这也与大渡河干暖河谷中游区降水量差别不大,造成各样地土壤水分含量异质性不大有关。

## 2.3 草地土壤质量指数

根据最小数据集(MDS)的公因子方差,运用公式(2)计算出最小数据集各土壤质量指标的权重(表 3),再根据公式(3)计算出草地土壤质量指数(SQI)。

表 3 最小数据集( Minimum data set, MSD)中的土壤指标的公因子方差及权重

Table 3 Commuality and weight of soil quality indicators in the MSD

指标 Soil indicators	公因子方差 Communalities	权重 Weights
土壤容重 Soil bulk density	0.845	0.253
非毛管孔隙度 Non capillary porosity	0.747	0.224
有机质 Organic content	0.906	0.272
碳氮比 C/N ratio	0.846	0.254

MDS 中各理化指标对土壤质量指数的影响见图 1, 非毛细孔隙度对草地土壤质量的影响为最大, 土壤质量指数分布在 0.033—0.115, 均值为 0.077; 碳氮比对土壤质量影响最小, 其土壤质量指数分布在 0.02—0.064, 均值为 0.048。MDS 中各土壤理化指标对土壤质量指数的影响大小依次为: 非毛细孔隙度 > 容重 > 有机质 > 碳氮比。

研究区不同坡向草地土壤质量存在一定差异(图 2), 可根据 SQI 高低分为 2 组, 其中, SQI 较高的一组东北坡 > 东坡 > 西坡 > 北坡, SQI 较低的一组西南坡 > 南坡 > 东南坡, SQI 总体呈现由东北向西南递减的趋势, 表明大渡河干暖河谷草地土壤质量的坡向空间变异较大。东北坡、东坡和北坡 SQI 受土壤容重的影响较大; 东南坡、南坡、西坡、西北坡、西南坡 SQI 受土壤非毛细孔隙度的影响较大; 不同坡向 MSD 各指标 SQI 平均值: 非毛细孔隙度 > 容重 > 有机质 > 碳氮比, 非毛细孔隙度对土壤质量影响最大。

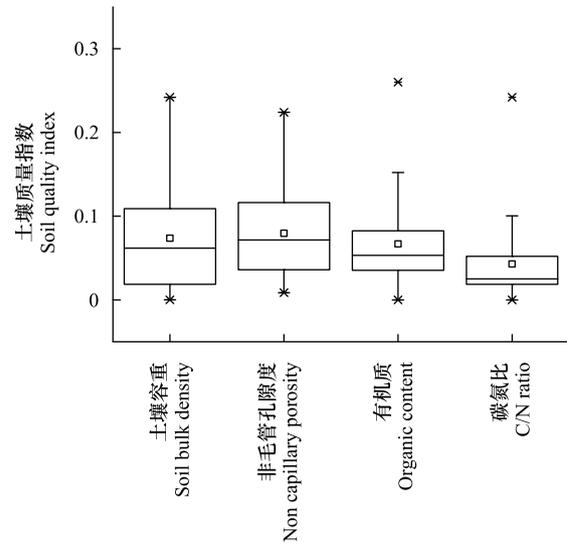


图 1 最小数据集 (MSD) 土壤理化指标对土壤质量指数的影响  
Fig.1 Comparison of soil quality of soil indicators in MDS (Minimum data set)

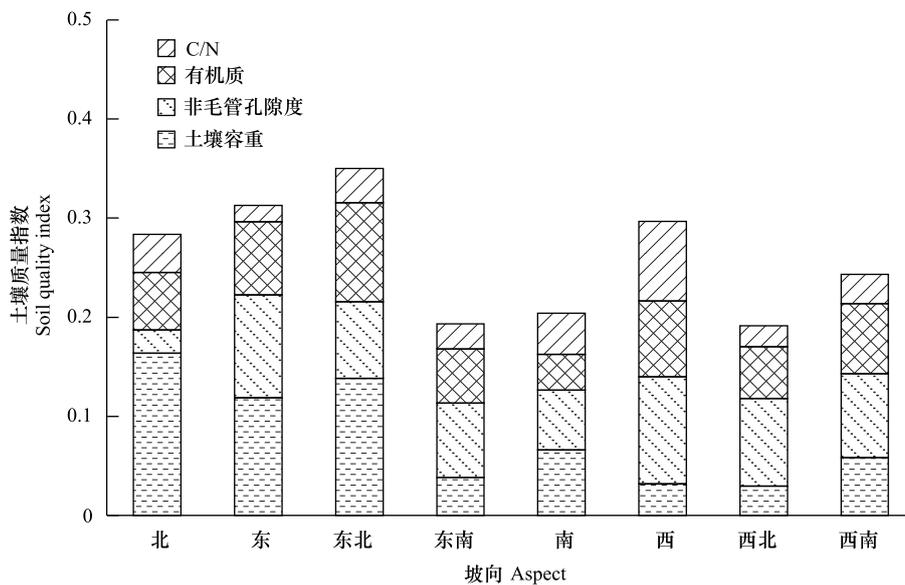


图 2 坡向与土壤质量指数 (SQI) 之间的关系  
Fig.2 The relationship between aspect and SQI (Soil quality index)

植被盖度是评估土地退化的有效指数<sup>[28]</sup>。由图 3 可知, 大渡河干暖河谷土壤质量随着植被盖度的减少而降低, 与盖度 > 70% 的草地土壤相比, 50%—70%、30%—50% 和 < 30% 盖度的草地 SQI 分别降低了 12.9%、33.7% 和 37.9%。土壤容重与植被盖度具有较好相关性, 随着草地植被盖度的减少, 土壤容重对土壤质量的影响增强, 非毛细孔隙度、土壤有机质和碳氮比则逐渐减弱。植被盖度 < 30% 草地 MDS 各指标土壤质量指数: 土壤容重 > 非毛细孔隙度 > 有机质 > 碳氮比, 而 > 70% 盖度草地 MDS 各指标土壤质量指数: 非毛细孔隙度 > 有机质 > 土壤容重 > 碳氮比, 表明低植被盖度土壤质量主要受土壤容重和非毛细孔隙度的影响, 而高植被盖度土壤质量主要受土壤非毛细孔隙度和有机质影响。

磷和钾是植物生长必须的营养元素,也是土壤肥力的重要组成部分。本文分析发现这两项指标并非影响大渡河干暖河谷草地土壤质量的主要指标。为了评价钾和磷对土壤质量的影响,本文将磷和钾分别加入重建 MSD I 和 MSD II。土壤全磷除与有效磷显著相关外,还与砾石含量、容重、含水率、非毛管孔隙度和速效钾等 5 个指标显著相关,而有效磷则与容重、含水率、毛管空隙度和全钾等 4 个指标显著相关(表 2),按照相关性较高的土壤指标只有一个可以入选最小数据集,并且应选择与其他指标相关性较弱的指标进入最小数据集的原则,将有效磷纳入新建的最小数据集 I (MSD I),同时去掉与其显著相关的土壤容重指标,MSD I 包括有效磷、有机质、非毛管空隙度和碳氮比等 4 个指标。以相同的方式重建钾对土壤质量的影响最小数据集 II (MSD II),包括速效钾、有机质、非毛管空隙度和容重等 4 个指标,通过公式(2)和(3)分别计算对 SQI I 和 SQI II 进行计算。

由图 4 可知,MSD I 中,对土壤质量的影响最大的是土壤有机质含量,SQI I 集中分布在 0.047—0.116,均值为 0.090;有效磷对土壤质量影响最小,SQI I 分布在 0.007—0.024,均值较土壤有机质降低了 61.1%,也低于 MSD I 中其他指标,可见,土壤有效磷并非影响大渡河干暖河谷区草地土壤质量的核心土壤理化指标;将速效钾纳入 MSD II 后,对土壤质量的影响最大的是容重(图 5),SQI II 分布在 0.030—0.164,均值为 0.109,速效钾对土壤质量影响最小,SQI II 集中分布在 0.015—0.046,均值较土壤有机质降低了 68.8%,土壤速效钾也非影响大渡河干暖河谷区土壤质量的核心土壤理化指标。因此,本文评价大渡河干暖河谷草地土壤质量所使用的 MSD 是合理的。

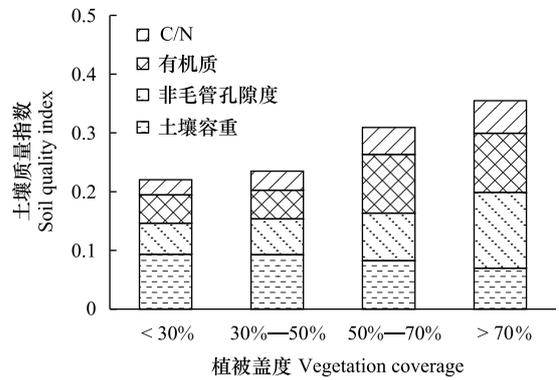


图 3 植被盖度与土壤质量指数(SQI)之间的关系

Fig.3 The relationship between vegetation coverage and SQI (Soil quality index)

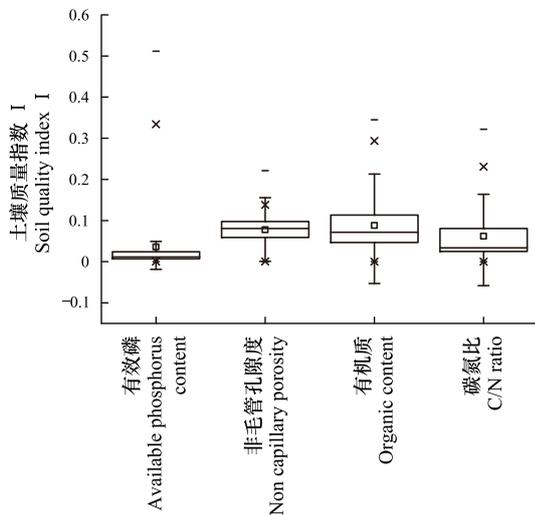


图 4 最小数据集 (Minimum data set I, MSD I) 土壤理化指标对土壤质量指数的影响

Fig.4 Comparison of soil quality of soil indicators in MSD I

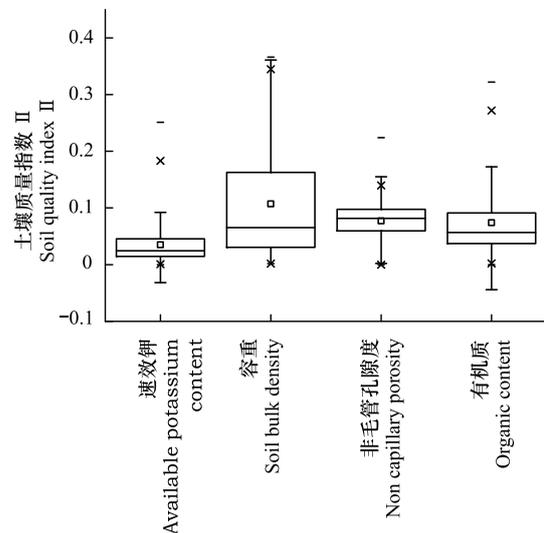


图 5 最小数据集 (Minimum data set II, MSD II) 土壤理化指标对土壤质量指数的影响

Fig.5 Comparison of soil quality of soil indicators in MSD II

## 2.4 土壤质量等级划分

本文用“箱形图”表征各植被类型土壤质量指数分散情况,分析土壤质量分布特征(图6),将研究区的土壤质量分为由低到高的 I—IV 级,各级别土壤质量指数分布情况如下: I 级 0.069—0.190, II 级 0.190—0.251, III 级 0.251—0.344, IV 级 0.344—0.567。根据各坡向 SQI 将东北坡划分为 IV 级,东坡、西坡、北坡是 III 级,西南坡、南坡和东南坡是 II 级,仅西北坡是 I 级。不同草地植被盖度土壤质量均值分级均在 II 级以上,可见,坡向对土壤等级的划分更加细致准确,II 级和 III 级等中间级别分布较多,参照第二次全国土壤普查中所采用的 6 级土壤肥力的分级标准<sup>[29]</sup>,大渡河干暖河谷区草地土壤肥力在 2—4 级之间,也属于中等肥力水平。

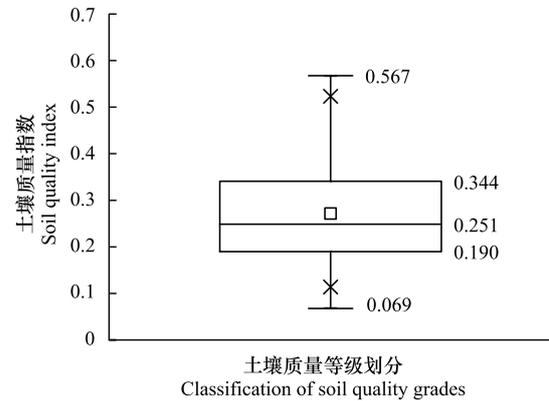


图6 土壤质量等级划分

Fig.6 Classification of soil quality grades

## 3 讨论

### 3.1 坡向对土壤质量的影响

坡向对河谷区土壤生境因子(土壤含水量、土壤养分)影响较大<sup>[15]</sup>。本研究发现,大渡河干暖河谷区草地土壤质量从东北坡到西南坡逐渐降低,与吴昊<sup>[30]</sup>与刘旻霞等<sup>[31]</sup>关于土壤因子对坡向的响应研究结果一致。由于北半球南坡所接受的太阳辐射明显强于北坡,且日照时间长,蒸发量大,在河谷区南坡形成热而干旱的微气候,而北坡则正好相反<sup>[31]</sup>,受这些因素的影响,南坡土壤矿化作用远高于北坡,地温变化更剧烈,进而对土壤微生物活性产生不利影响<sup>[32]</sup>。相对而言,北坡光照恒定,地温趋于稳定,更有利于土壤动物和微生物活动<sup>[33]</sup>。在草地生态系统服务功能中,土壤微生物的生物化学活性对土壤肥力影响较大,进而影响草地植物生长发育与土壤健康状况<sup>[34]</sup>,导致北坡土壤有机质及氮素的分解和转化速率相对低于南坡,更有利于养分积累。

### 3.2 植被盖度对土壤质量的影响

植物群落的变化总是与土壤相关联,土壤为植被的存在和发展提供必要的物质基础,土壤质量的变化会在一定程度上影响植被的变化,反过来植被的变化也会影响土壤发育<sup>[35-36]</sup>。大渡河干暖河谷区草地土壤质量随着植被盖度的减少而降低,这与尚占环<sup>[37]</sup>和刘鑫<sup>[23]</sup>等有关草地土壤质量与植被盖度关系的研究结果一致,随着生态系统的退化,草地表层失去植被保护导致表层土壤养分流失<sup>[38]</sup>,进而降低了土壤质量。

本研究发现高盖度草地土壤质量主要受非毛管孔隙度影响,非毛管孔隙度大则土壤通透性强,有利于土壤生物(土壤动物、微生物)生长和土壤有机质含量增加<sup>[39]</sup>,从而促进了主要来源于植物根、土壤微生物、植物和动物残留物的土壤酶增加,有利于土壤质量的提高<sup>[40]</sup>。反之,土壤质量的恶化也体现在土壤微生物和土壤动物的生存与繁衍受到严重威胁<sup>[41]</sup>。低植被盖度草地土壤质量主要受容重影响,容重、有机质是表征土壤理化性质的重要参数,对土壤肥力状况、结构稳定性及抗蚀性能有着重要的影响<sup>[42]</sup>,容重越大,土壤越紧实,导致土壤通气性小,不利于土壤动物和微生物的生存和活动,从而降低了土壤有机质的形成与转化速率,使土壤质量降低。此外,虽然河谷区土壤粘化作用微弱,钙化作用明显,潜在肥力水平较高,但由于焚风效应和干湿季节分明的气候特点,河谷区土壤水分的限制作用降低了土壤有效性肥力的转化形成<sup>[43-44]</sup>,也不利于土壤质量的提高。土壤容重较高是导致河谷区低植被盖度的草地土壤质量指数较低的主要原因。

### 3.3 土壤磷和钾对土壤质量的影响

土壤磷和钾作为植物生长必须的营养元素是土壤质量研究中的重要因子。本研究发现磷和钾并非影响大渡河干暖河谷草地土壤质量的主要指标,这与磷和钾含量的高低和分布与地形、母质等自然因素有关,主要

决定于母质<sup>[45]</sup>,干暖河谷具有的光热资源及水热条件有利于土壤中钾和磷的释放,河谷区土壤潜在肥力水平较高<sup>[43-44]</sup>,土壤中磷和钾供给量与植被盖度之间无明显的关系<sup>[46]</sup>,未对草地植物生长造成显著影响。

### 3.4 土壤质量评价

大渡河干暖河谷区草地质量分级表明,土壤质量中间级别占比大,且大多处在 2—4 级的中等肥力水平。总体来看,该区域草地土壤质量较好,潜在肥力水平较高,对于植物生长和植被演替十分有利,是今后植被人工恢复和重建的重点区域。在大渡河干暖河谷区植被恢复过程中,应综合考虑区域土壤特性、植被群落情况、地形地貌、气候条件和管理措施等因素,科学开展裸地和稀疏草地植被恢复,促进大渡河干暖河谷植被生态治理,增强干暖河谷水土保持能力。草地土壤质量评价为植被恢复过程中各环境因子调节以及生态系统多元功能之间的权衡提供了科学依据,提供未来发展变化趋势的有效预警,使草地系统在科学的调控下可持续发展。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 关文彬, 冷民生, 马克明, 刘国华, 汪西林. 岷江干旱河谷植被分类及其主要类型. 山地学报, 2004, 22(6): 679-686.
- [ 2 ] 罗清虎, 孙凡, 吴建召, 崔羽, 林勇明, 王道杰, 吴承祯. 泥石流频发流域物源区坡面植被群落特征. 应用与环境生物学报, 2018, 24(4): 681-688.
- [ 3 ] 石承苍, 雍国玮. 长江上游干热干旱河谷生态环境现状及生态环境重建的对策. 西南农业学报, 2001, 14(4): 114-118.
- [ 4 ] 周述明. 瀑布沟水电站工程建设区植被保护及生态恢复探讨. 四川水力发电, 2011, 30(2): 149-153.
- [ 5 ] 方海东, 纪中华, 杨艳鲜, 拜得珍, 廖承飞. 金沙江干热河谷新银合欢人工林物种多样性研究. 水土保持研究, 2005, 12(1): 135-137.
- [ 6 ] 吴宁, 乔永康, 蒋勇. 茂汶干旱河谷灌丛草地的特点和利用. 资源开发与保护, 1989, 5(3): 42-44.
- [ 7 ] 向师庆, 吕井. 灌草丛根系在保护土壤资源上的研究. 北京林业大学学报, 1988, 10(4): 24-30.
- [ 8 ] 房舒. 干旱河谷景观格局特征及其指数粒度效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [ 9 ] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 郑华. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. 生态学报, 2004, 24(6): 1101-1110.
- [ 10 ] 宋明华, 刘丽萍, 陈锦, 张宪洲. 草地生态系统生物和功能多样性及其优化管理. 生态环境学报, 2018, 27(6): 1179-1188.
- [ 11 ] 王会儒, 陈国鹏, 王飞, 曹秀文, 郭星. 干旱河谷植物生态适应与植被恢复. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 60-67.
- [ 12 ] Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, Stewart B A. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Madison: SSSA Special Publication, American Soil Agronomy, 1994: 3-21.
- [ 13 ] 李强, 许明祥, 赵允格, 高丽倩, 张金, 张晓伟. 黄土高原坡耕地沟蚀土壤质量评价. 自然资源学报, 2012, 27(6): 1001-1012.
- [ 14 ] 王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应. 水土保持通报 2001, 22(1): 1-5.
- [ 15 ] Gong X, Brueck H, Giese K M, Zhang L, Sattelmacher B, Lin S. Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China. Journal of Arid Environments, 2008, 72(4): 483-493.
- [ 16 ] 方精云, 沈泽昊, 崔海亭. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容. 生物多样性, 2004, 12(1): 10-19.
- [ 17 ] 余大富. 贡嘎山的土壤及其垂直地带性. 土壤通报, 1984, 15(2): 65-68.
- [ 18 ] 王良健. 四川泸定、石棉境内大渡河河谷土壤及其生态建设. 地理研究, 1993, 12(1): 101-110.
- [ 19 ] 刘尉. 大渡河中游干旱河谷区云南松人工林凋落叶分解和土壤呼吸对增加降水的响应[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
- [ 20 ] 赵琳, 杨育林, 鄢武先, 尤继勇, 靳伟, 吴雨峰, 张好, 袁龙飞. 川西干旱河谷植被恢复立地质量评价. 南方林业科学, 2018, 46(4): 51-62.
- [ 21 ] 刘尉, 王丽华, 刘林, 符饶, 吴小辉, 黄从德. 增加降水对四川干旱河谷区云南松人工林凋落叶分解的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2017, 45(2): 88-95.
- [ 22 ] 劳家桢. 土壤农化分析手册. 北京: 农业出版社, 1988.
- [ 23 ] 刘鑫, 王一博, 吕明侠, 孙岩, 杨文静, 赵金鹏. 基于主成分分析的青藏高原多年冻土区高寒草地土壤质量评价. 冰川冻土, 2018, 40(3): 469-479.
- [ 24 ] Sánchez-Navarro A, Gil-Vázquez J M, Delgado-Iniesta M J, Marin-Sanleandro A, Blanco-Bernardeau R, Ortiz-Silla R. Establishing an index and identification of limiting parameters for characterizing soil quality in Mediterranean ecosystems. CATENA, 2015, 131: 35-45.
- [ 25 ] Yemefack M, Jetten V G, Rossiter D G. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems. Soil and Tillage Research, 2006, 86(1): 84-98.
- [ 26 ] 李桂林, 陈杰, 孙志英, 檀满枝. 基于土壤特征和土地利用变化的土壤质量评价最小数据集确定. 生态学报, 2007, 27(7): 2715-2724.
- [ 27 ] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 90(1): 25-45.

- [28] Dymond J R, Stephens P R, Newsome P F, Wilde R H. Percentage vegetation cover of a degrading rangeland from SPOT. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(11): 1999-2007.
- [29] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1988.
- [30] 吴昊. 秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系. *自然资源学报*, 2015, 30(5): 858-869.
- [31] 刘旻霞. 甘南高寒草甸植物元素含量与土壤因子对坡向梯度的响应. *生态学报*, 2017, 37(24): 8275-8284.
- [32] 陈颖, 雷波, 罗承德, 汪航玉, 马丹, 刘丽. 康定木格措冷杉林土壤有机质水平及其预测. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 252-257.
- [33] 苏静, 赵世伟. 土壤团聚体稳定性评价方法比较. *水土保持通报*, 2009, 29(5): 114-117.
- [34] 赵吉, 廖仰南, 张桂枝, 邵玉琴. 草原生态系统的土壤微生物生态. *中国草地*, 1999, (3): 57-67.
- [35] 曲国辉, 郭继勋. 松嫩平原不同演替阶段植物群落和土壤特性的关系. *草业学报*, 2003, 12(1): 18-22.
- [36] 欧阳学军, 黄忠良, 周国逸, 褚国伟, 李炯, 史军辉, 徐国良. 鼎湖山亚热带森林群落演替对土壤化学性质影响的累积效应研究. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 51-54.
- [37] 尚占环, 丁玲玲, 龙瑞军, 马玉寿. 江河源区退化高寒草地土壤微生物与地上植被及土壤环境的关系. *草业学报*, 2007, 16(1): 34-40.
- [38] 李元寿, 王根绪, 王军德, 王一博, 吴青柏.  $^{137}\text{Cs}$  示踪法研究青藏高原草甸土的土壤侵蚀. *山地学报*, 2007, 25(1): 114-121.
- [39] 胡尧, 李懿, 侯雨乐. 岷江流域不同土地利用类型土壤养分及微生物群落多样性研究. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(6): 971-977.
- [40] Li L, Liang X Q, Ye Y S, Zhao Y, Zhang Y X, Jin Y, Yuan J L, Chen Y X. Effects of repeated swine manure applications on legacy phosphorus and phosphomonoesterase activities in a paddy soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(2): 167-181.
- [41] Elhottová D, Szili-Kovács T, Tříska J. Soil microbial community of abandoned sand fields. *Folia Microbiologica*, 2002, 47(4): 435-440.
- [42] 谢贤健, 韦方强. 泥石流频发区不同盖度草地土壤颗粒的分形特征. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 202-206.
- [43] 陈学华. 岷江上游半干旱河谷土壤成土特征研究——以大沟流域为例. *资源开发与市场*, 1996, 12(2): 75-78.
- [44] 王春明, 包维楷, 陈建中, 孙辉, 谢嘉穗. 岷江上游干旱河谷区褐土不同亚类剖面及养分特征. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(3): 230-234.
- [45] Markewitz D, Richter D D. Long-term soil potassium availability from a Kanhapludult to an aggrading loblolly pine ecosystem. *Forest Ecology and Management*, 2000, 130(1/3): 109-129.
- [46] 丁松, 应学亮, 吕丹, 欧阳勋志. 赣南飞播马尾松林林下植被盖度对土壤质量的影响. *水土保持研究*, 2014, 21(3): 31-36.