

泥石流频发区山地土壤环境因子与植被群落垂直梯度及其关系分析——以云南小江流域为例*

张广帅^{1,2} 邓浩俊^{1,2} 俞伟^{1,2} 林勇明^{1,2**} 马瑞丰¹ 王道杰³ 吴承祯^{1,2,4} 洪伟^{1,2}

¹福建农林大学林学院 福州 350002

²福建省高校森林生态系统经营与过程重点实验室 福州 350002

³中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 成都 610041

⁴武夷学院 南平 354300

摘要 海拔梯度和土壤环境是影响山地植被群落结构的关键因素,为揭示泥石流频发区植被群落的空间分布与演替规律,通过SPSS主成分分析、皮尔逊相关性分析和CANOCO5.0二维排序研究云南小江流域泥石流频发区山地生态系统土壤环境因子和植被群落的垂直梯度分异及其相互关系。结果表明:在海拔梯度上,土壤的垂直地带性分异规律与纬度地带性分异规律类似,从高到低依次为温带地带性土壤、北亚热带地带性土壤和亚热带地带性土壤;草本植被大致可以划分为鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*) - 扭黄茅(*Heteropogon contortus*)群落、酢浆草(*Oxalis corniculata*) - 牛尾蒿(*Artemisia dubia*)群落和苞茅(*Hyparrhenia bracteata*)群落3类;因该区地质灾害及人为干扰严重,生态环境恶化,原生乔木群落已极少分布,现以华山松、云南松人工林为高山主要植被类型,松柏混交林为亚高山主要植被类型,桉树、新银合欢人工林为低山主要植被类型。从典范对应分析(CCA)排序结果来看,不同植被群落与土壤环境因子之间的关系存在明显分异。综上,海拔梯度、土壤有机质、土壤全磷和重金属(铜、锰)含量是影响泥石流频发区植被群落格局的主要因素。图2 表7 参35

关键词 泥石流频发区;土壤环境因子;植被群落;CCA排序;垂直梯度

CLC Q948.1

Vertical gradient analysis of soil environmental factors and vegetation community in mountain areas of frequent debris flow: a case study in the Xiaojiang Watershed, Yunnan*

ZHANG Guangshuai^{1,2}, DENG Haojun^{1,2}, YU Wei^{1,2}, LIN Yongming^{1,2**}, MA Ruifeng¹, WANG Daojie³, WU Chengzhen^{1,2,4} & HONG Wei^{1,2}

¹College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

²Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002, China

³Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China

⁴Wuyi University, Nanping 354300, China

Abstract Vertical gradient and soil environment are the key factors affecting mountain vegetation community structure. However little is known about the relationship between vegetation community and soil environmental factors. This paper aimed to determine the spatial distribution of vegetation community in typical area with high-frequency debris flow. SPSS principle component analysis, Pearson correlation analysis and CANOCO5.0 Two-dimensional ordination method were applied to determine the vertical gradient differentiation of the soil environmental factors and vegetation community as well as the relationship between them. The vertical zonal soil distribution rules were similar to latitude zonal distribution rules. The order from high to low was Temperate zonal soil, North subtropical zonal soil and Subtropical soil. The shrub-grassland community could be divided into three types, namely *Potentilla anserina* - *Heteropogon contortus* community, *Oxalis corniculata* - *Artemisia dubia* community and *Hyparrhenia bracteata* community. In the seriously degraded ecological environment caused

收稿日期 Received: 2014-02-22 接受日期 Accepted: 2014-04-16

*福建农林大学林学院青年科研基金项目(6112C039Q)、国家自然科学基金项目(41201564)和国家科技支撑计划专题(2012BAC06B02-02)联合资助 Supported by the Youth Science and Technology Foundation of Forestry College Fujian Agriculture and Forestry University (6112C039Q), the National Natural Science Foundation of China (41201564), and the Key Sci-Tech Project of China (2012BAC06B02-02)

**通信作者 Corresponding author (Email: monkey1422@163.com)

by geological disasters and human disturbances, native arbor community was scarcely distributed. The main vegetation types of alpine zone were artificial forests composed of *Pinus yunnanensis* and *Pinus armandii*; those of subalpine zone were mixed forests of pine and cypress; and those of lower mountain belt were artificial forests composed of *Eucalyptus robusta* and *Leucaena leucocephala*. Canonical correspondence analysis suggested a significant relationship between vegetation and soil environmental factors. The results suggested that the main factors affecting the vegetation distribution in the typical area with high frequency debris flow are elevation gradient, soil organic matter, soil total phosphorus and heavy metals.

Keywords debris flow prone areas; soil environment; vegetation community; CCA ordination; vertical gradient

植被与环境因子之间的关系一直是生态学研究领域中的热点问题^[1]。自然环境中的植被群落结构是物种对环境长期适应的结果^[2-3]，不同生态适应类型、不同层次的植被对环境因子响应程度的差异性，导致植被群落结构随环境梯度表现出分异格局^[4]。研究植被与环境之间的相互作用关系，有助于了解植被群落演替规律和物种的空间分布特征，进而为制定物种多样性保护对策、有效利用植物资源提供科学依据。

环境因子沿海拔梯度的变化比沿纬度梯度快1 000倍，因此山地植物群落的垂直梯度变化是生态学家研究植被-环境相互关系的重要对象^[5]。海拔梯度的变化会导致温度、水分、光照等多种环境因子的变化，进而引起山地区域小气候、土壤理化特征等环境系统的梯度效应^[6]。云南小江流域山地海拔最高达4 016 m，最低为691 m，相对高差超过3 000 m，作为干热河谷的典型流域，小江流域泥石流灾害活动强烈，流域两侧山体及植被破坏严重，不仅加剧土壤侵蚀，制约土壤的正常分布规律，还会影响植被群落的空间分布和多样性组成，最终造成区域生态系统的退化。长期以来人们对小江流域两侧山地的研究主要涉及土壤侵蚀^[7-8]、景观格局演变^[9]、泥石流滩地利用^[10-11]、植被恢复技术^[12]等方面，而土壤环境与植被群落的梯度效应分析方面鲜见报道。本研究通过对不同海拔土壤环境和植被群落进行CCA环境排序，揭示泥石流频发区山地土壤理化因子和植被群落的垂直梯度分异规律和环境梯度效应，进而为山区自然资源的合理利用及生态恢复提供理论依据。

1 研究区概况

小江流域（东经102°52′-103°22′，北纬25°32′-26°35′）为金沙江一级支流，发源于滇东北高原鱼味后山，自南向北流经云南寻甸县、东川市及会泽县境，全长138.2 km，流域面积3 043.45 km²。小江河谷发育在小江深大断裂带上，属深切切割构造型河谷，新老构造错综复杂，新构造运动强烈，河谷两侧地形陡峻。受地形条件的制约，本区气候类型复杂，垂直地带性分异明显，年平均气温17-19℃，年平均日较差8-9.5℃，≥10℃的年活动积温5 100-6 500℃，年平均降雨量740-810 mm，年蒸发量为3 000 mm，干燥指数为2.49-2.02，干湿季节分明，雨季（5-11月）降雨量占全年总降雨量的80%以上，年平均日照时数2 236 h，夏季日照时数470 h，占全年日照时数的21%，冬春日照长，光质好。小江河谷按海拔高程可分为4个不同气候带，即河谷半干旱亚热带（海拔900-1 500 m），中山下部干湿交替中、北亚热带（海拔1 500-2 000 m），中山半湿润暖温带（2000-2500 m）以及寒温带湿润山地区（海拔

2 500-3 000 m及以上山区）^[13]。

2 研究方法

2.1 实验设计与样本采集

调查于2012年7-8月和2013年7-9月进行。在小江流域支流阿旺小河西侧山地，沿海拔梯度（海拔范围1 500-3 000 m）选择3个样带从低到高设置典型乔木和灌草样方，其中样带1的起始海拔为1 500 m，终止海拔为2 949 m，共设置7个样方（包括4个灌草样方S8、S12、S10、S9和3个乔木样方T6、T3、T1）；样带2的起始海拔为1 591 m，终止海拔为2 952 m，同样设置7个样方（包括4个灌草样方S7、S5、S3、S2和3个乔木样方T8、T7、T2）；样带3的起始海拔为1 549 m，终止海拔为3 000 m，也设置了7个样方（包括4个灌草样方S6、S11、S4、S1和3个乔木样方T5、T4、T1）。样带设置包含3个海拔范围，在1 500-2 000 m、2 000-2 500 m、2 500-3 000 m范围内各设置7个样方，样方的设置尽可能代表每个海拔梯度的整体情况。样方设置后，对各样方内的植被情况进行调查（表1、2），总计调查样方21个，乔木样方面积为20 m×20 m，灌草样方面积为2 m×2 m^[14]，记录各个物种的多度、盖度、高度以及乔木的胸径。

用手持GPS500测定每个调查样方的海拔，并用地质罗盘仪测量坡度。在每个样方内，用环刀法对0-30 cm的土壤进行3点重复取样，混合后密封，带回实验室测定。土壤容重用环刀法测定；土壤含水量用烘干法测定；土壤颗粒分级采用马尔文激光粒度仪测定；化学性质参照土壤理化分析^[15]进行，过0.149 mm筛的土壤可测有机质、全氮、全磷、全钾、铝、镁、铜、锰，过2 mm筛的土壤可测碱解氮、有效磷、速效钾。其中土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定；全氮含量采用半微量-凯氏法测定；碱解氮含量采用碱解扩散法测定；全磷含量采用碱熔-钼锑抗显色法测定；有效磷含量采用盐酸-硫酸浸滴法测定；全钾含量采用碱熔-火焰光度法测定；速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定；铝采用铝试剂比色法测定；锰、铜、镁采用酸溶-原子吸收分光光度法测定。

2.2 数据处理与分析

野外调查数据、土壤理化性质和物种多样性数据用EXCEL2007建库并进行初步整理。利用SPSS19.0对植被及其环境因子进行主成分分析、单因素方差分析（One-Way ANOVA）、LSD多重比较和皮尔逊相关分析；利用国际通用的CANOCO5.0对植被和环境因子数据进行典范对应分析排序（CCA）。其中物种的重要值采用公式（1），物种的多样性指数采用Whittaker优势度多样性指数^[16]即公式（2）：

表1 灌草丛样地概况

Table 1 Description of the shrub-grassland sample plots

样地 Plot	海拔(h/m) Elevation	经度 Longitude	纬度 Latitude	坡度(α°) Slope	土壤类型 Soil type	盖度(r/%) Coverage	优势群落 Advantage community
S1	3000	103°11.877'	25°52.877'	14	高山草甸土 Alpine meadow soil	90	芎藭-鹅绒委陵菜-毛茛丛 <i>Arthraxon hispidus</i> - <i>Potentilla anserina</i> - <i>Ranunculus japonicus</i>
S2	2952	103°12.25'	25°52.522'	11	暗棕壤 Dark brown soil	65	美丽胡枝子-野荞麦-鹅绒委陵菜丛 <i>Lespedeza formosa</i> - <i>Fagopyrum urophyllum</i> - <i>P. anserina</i>
S3	2785	103°12.52'	25°52.982'	25	棕壤 Brown soil	85	牛尾蒿-山茶花-苦刺丛 <i>Artemisia dubia</i> - <i>Camellia japonica</i> - <i>Solanum deflexicarpum</i>
S4	2797	103°12.497'	25°52.967'	18	坡积物 Slope wash	60	鹅绒委陵菜-扭黄茅-马桑丛 <i>Potentilla anserina</i> - <i>Heteropogon contortus</i> - <i>Coriaria nepalensis</i> Wall
S5	2490	103°13.082'	25°53.28'	26	红黄壤 Red and yellow soil	95	扭黄茅-蜈蚣蕨-短梗苞茅丛 <i>Heteropogon contortus</i> - <i>Pteris vittata</i> - <i>Hyparrhenia diplandra</i>
S6	1856	103°13.797'	25°54.141'	24	红壤 Red soil	65	扭黄茅-香茅-紫荆泽兰丛 <i>Heteropogon contortus</i> - <i>Cymbopogon citratus</i> - <i>Eupatorium adenophorum</i>
S7	2248	103°13.392'	25°53.301'	49	坡积物 Slope wash	40	酢浆草-野艾蒿-牛尾蒿丛 <i>Oxalis corniculata</i> - <i>Artemisia lavandulaefolia</i> .DC - <i>Artemisia dubia</i>
S8	1625	103°14.613'	25°55.294'	36	黄壤 Yellow soil	85	苞茅-毛子草-留兰香丛 <i>Hyparrhenia bracteata</i> - <i>Incarvillea argute</i> - <i>Mentha spicata</i>
S9	2260	103°13.437'	25°53.593'	6	暗棕壤 Dark brown soil	35	酢浆草-牛尾蒿-斑茅丛 <i>Oxalis corniculata</i> - <i>Artemisia dubia</i> - <i>Saccharum arundinaceum</i>
S10	2000	103°13.652'	25°53.943'	19	红棕壤 Red brown soil	85	紫茎泽兰-苦蒿-苞茅丛 <i>Eupatorium adenophorum</i> - <i>Acroptilon repens</i> - <i>Hyparrhenia bracteata</i>
S11	2253	103°13.49'	25°53.578'	30	红壤 Red soil	80	苞茅-红蓼-野拔子丛 <i>Hyparrhenia bracteata</i> - <i>Polygonum orientale</i> - <i>Elsholtzia rugulosa</i>
S12	1500	103°14.778'	25°55.461'	31	黄壤 Yellow soil	75	皱果苋-芎藭-革命菜丛 <i>Amaranthus viridis</i> - <i>Arthraxon hispidus</i> - <i>Crassocephalum crepidioides</i>

表2 乔木群落样地概况

Table 2 Description of the arbor community sample plots

样地 Plot	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 (h/m) Elevation	坡度 (α°) Slope	植被类型 Vegetation type	龄组 Age group	优势树种 Dominant Species	平均高度 (h/m) Mean height	平均胸径(h/cm) Average diameter at breast height
T1	103°12'15.0"	25°52'31.3"	2949	11	华山松针叶林 Coniferous forest of <i>Pinus armandii</i>	中龄林 Immature forest	华山松 <i>P. armandii</i>	4	8.1
T2	103°12'30"	25°52'58.9"	2878	25	华山松针叶林 Coniferous forest of <i>P. armandii</i>	近成熟林 Nearly matured forest	华山松 <i>P. armandii</i>	10.1	14.1
T3	103°12'38.9"	25°52'54.6"	2746	8	华山松针叶林 Coniferous forest of <i>P. armandii</i>	中龄林 Immature forest	华山松 <i>P. armandii</i>	6.2	9.5
T4	103°12'31"	25°52'56.5"	2755	5	云南松针叶林 Coniferous forest of <i>P. yunnanensis</i>	近成熟林 Nearly matured forest	云南松 <i>P. yunnanensis</i>	10.3	16.4
T5	103°12'36.9"	25°52'59.6"	2440	28	松柏混交林 Mixed forests of pine and cypress	幼龄林 Sapling forest	柏树、云南松 <i>C. funebris</i> , <i>P. yunnanensis</i>	4.2 2.3	5.2 2.7
T6	103°13'20.22"	25°53'32.04"	2324	25	松柏混交林 Mixed forests of pine and cypress	中龄林 Immature forest	柏树、华山松、云南松 <i>C. funebris</i> , <i>P. armandii</i> , <i>P. yunnanensis</i>	4 3.6 3	6.2 8.2 5.2
T7	103°13'29.40"	25°53'34.68"	1958	30	柏树林 Forest of cypress	中龄林 Immature forest	柏树 <i>C. funebris</i>	5.7	9.3
T8	103°14'46.68"	25°55'7.64"	1591	36	新银合欢林 Forest of <i>Leucaena leucocephala</i>	中龄林 Immature forest	新银合欢 <i>L. leucocephala</i>	10.3	10.4
T9	103°14'46.68"	25°55'27.66"	1549	31	桉树林 Forest of <i>Eucalyptus robusta</i>	老龄林 Over matured forest	桉树 <i>E. robusta</i>	10.6	16.33

物种的重要值=(相对多度+相对高度+相对盖度)/3 (1)

WI = S / (ln Pi - ln Pmax) (2)

式中, WI为Whittaker优势度多样性指数, S为物种数, Pi为最小的重要值, Pmax为最大的重要值.

3 结果与分析

3.1 土壤环境因子的主成分辨识

对海拔和土壤理化性质等17个因子进行主成分分析, 计算结果(表3)表明, 前3个主成分提供的信息量分别为56.45%、21.34%、7.40%, 前2个主成分累计贡献率达77.79%, 符合主成分分析的要求. 第一主成分中特征向量绝对值较大的环境因子有含水率、粘粒、有机质、海拔和碱解氮, 主要表征土壤的机械组成与海拔相关性较强, 其中有机质、含水率和海拔呈正相关, 粘粒和海拔呈负相关; 第二主成分中特征向量绝对值较大的环境因子有全钾、有效磷、速效钾、铜和锰, 主要反映土壤的速效养分和重金属含量; 第三主成分中特征向量绝对值较大的环境因子有镁和铝.

根据主成分分析结果, 选取各个主成分中负荷量较大且与土壤理化性质联系密切的因子作为主要的环境因子^[17]. 即利用海拔、含水率、粘粒、有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾、铝、铜、锰、镁共计13个指标进行土壤环境因子相关性分析和典范对应分析(CCA)排序.

3.2 土壤环境因子的垂直地带性特征

对不同海拔梯度的土壤理化性质比较分析(表4)表明, 海拔梯度对土壤含水率、粘粒、有机质、速效钾和铜具有极显著影响(P<0.01), 对全氮、全磷、镁具有显著影响(P<0.05), 而对全钾、有效磷、锰影响不显著.

土壤有机质除了受植被因素影响还受宏观气候因素影响^[18-19], 一般温度越低, 土壤有机质分解速率越小, 年平均气温下降1℃, 土壤有机质含量增加2-3倍^[20-23]. 土壤水分也会影响土壤有机质的分解, 除常年渍水的湿地土壤外, 含水率越高, 有机质分解速率越慢^[24]. 土壤全氮与有机质呈显著线性正相关关系(表5), 因此全氮与有机质的分布趋势一致, 土壤全氮含量决定于有机质含量. 土壤全钾含量普遍较高, 且随着海拔梯度的升高而减少, 主要因为全钾含量受母质影响较大, 且向下淋溶易被土壤粘粒吸附, 不具有表聚性, 土

壤全钾含量与粘土一致.

表3 主成分因子负荷量、特征根与贡献率
Table 3 Loading factor, eigenvalue and contribution ratio of principle components

因子 Factor	成分 Component		
	I	II	III
容重 Bulk density	0.70	0.61	-0.10
含水率 Water content	-0.94	-0.14	-0.25
粘粒 Clay	0.94	-0.04	-0.14
粉粒 Particle	0.74	-0.33	-0.34
砂粒 Sand	-0.72	0.27	0.30
海拔 Elevation	-0.89	-0.27	0.23
有机质 Organic matter	-0.91	0.30	-0.07
全氮 Total nitrogen	-0.88	0.23	-0.19
全磷 Total phosphorus	0.66	0.39	-0.22
全钾 Total potassium	0.65	0.76	0.29
碱解氮 Available nitrogen	-0.87	0.24	-0.18
有效磷 Available phosphorus	0.57	0.79	-0.01
速效钾 Available potassium	0.38	-0.77	-0.29
Al	0.31	-0.51	0.84
Mg	0.46	0.25	0.82
Cu	0.72	-0.85	-0.19
Mn	0.06	-0.80	0.51
特征根 Eigenvalue	9.60	3.63	1.26
贡献率 Contribution ratio (r/%)	56.45	21.34	7.40
累计贡献率 Cumulative contribution ratio (r/%)	56.45	77.79	85.18

对不同海拔梯度的土壤理化性质进行CCA排序分析, 并用Canoco进行Monte Carlo检验, 结果表明CCA第1排序轴和所有排序轴的典范系数反映的回归系数具有显著性(P=0.002), 前两个排序轴的特征值占总特征值的98.2%, 说明排序结果良好. CCA排序能直观反映出海拔梯度及地形坡度对土壤养分空间变异的影响程度. 箭头的长短表示土壤理化性质与地形因子关系的大小, 箭头与排序轴的夹角表示与该排序轴相关性大小, 箭头所处的象限表示地形因子与排序轴的正负相关关系. 图1表明, 海拔梯度和坡度的箭头长度较大, 且海拔与第1排序轴的夹角较小, 说明海拔梯度对土壤理化性质的空间分异具有重要影响, 可以认定第1排序轴是一个海拔梯度变化轴, 即沿该轴方向, 海拔梯度有降低趋势. 综合CCA第1、2排序轴的生态学意义, 可知土壤有机质、全氮、含水率、锰与海拔具有较强的正相关性, 而土壤全钾、有效

表4 不同垂直带土壤环境因子方差分析
Table 4 Variance analysis of soil environmental factors in different perpendicular bands

海拔(h/m) Elevation	土壤环境因子 Soil environmental factor											
	含水率 Water content (w/%)	粘粒 Clay (w/%)	有机质 Organic matter (w/g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (w/g kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (w/g kg ⁻¹)	全钾 Total potassium (w/g kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus (w/mg kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (w/mg kg ⁻¹)	Al (w/g kg ⁻¹)	Mg (w/g kg ⁻¹)	Cu (w/g kg ⁻¹)	Mn (w/g kg ⁻¹)
3000-2500	46.11a	3.01a	60.65a	2.89a	0.99a	1.87a	4.49a	10.85a	0.21a	0.21a	0.14a	1.08a
2500-2000	31.22a	6.95b	34.98b	2.08ab	1.56ab	1.92a	6.21a	21.19b	0.24a	0.29a	0.20b	1.13a
2000-1500	21.11b	7.69b	29.76b	1.54b	2.08b	2.81a	17.34a	15.67c	0.22a	0.43b	0.21b	0.93a
P	0.001**	0.0001**	0.002**	0.010*	0.025*	0.172	0.252	0.0001**	0.078	0.007*	0.004**	0.365

同列不同字母表示不同海拔梯度间差异显著(P<0.05), **为极显著(P<0.01), *为显著(P<0.05).
Lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level; ** indicates significance at 0.01 level; * indicates significance at 0.05 level.

表5 土壤理化性质皮尔逊相关性分析

Table 5 Pearson correlation analysis of soil physicochemical properties

	EL	OM	TN	TP	TK	AP	AK	Al	Mg	Cu	Mn	SW	CLC	WI
EL	1													
OM	0.655*	1												
TN	0.639*	0.952**	1											
TP	-0.643*	-0.543	-0.502	1										
TK	-0.714**	-0.387	-0.433	0.545	1									
AP	-0.715**	-0.280	-0.315	0.663*	0.923**	1								
AK	-0.156	-0.513	-0.329	0.061	-0.198	-0.246	1							
Al	-0.346	-0.585*	-0.605*	0.236	0.230	0.132	0.323	1						
Mg	-0.613*	-0.552	-0.522	0.423	0.813**	0.579*	0.094	0.265	1					
Cu	-0.551	-0.789**	-0.707*	0.183	0.060	-0.040	0.642*	0.305	0.366	1				
Mn	0.291	-0.336	-0.292	-0.321	-0.362	-0.639*	0.408	0.343	0.163	0.436	1			
SW	0.808**	0.823**	0.815**	-0.589*	-0.786**	-0.646*	-0.197	-0.451	-0.875**	-0.606*	-0.099	1		
CLC	-0.878**	-0.869**	-0.796**	0.665*	0.543*	0.482	0.407	0.518	0.584*	0.656*	0.027	-0.798**	1	
WI	-0.446	-0.604*	-0.380	0.227	0.177	0.054	0.658*	0.103	0.546	0.756**	0.356	-0.540	0.590*	1

EL: 海拔; OM: 有机质; TN: 全氮; TP: 全磷; TK: 全钾; AP: 有效磷; AK: 速效钾; SW: 含水率; CLC: 粘土; WI: Whittaker优势度多样性指数. *表示在0.05上显著相关, **表示在0.01上显著相关.

EL: Elevation; OM: Organic matter; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; TK: Total potassium; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium; SW: Water content; CLC: Clay; WI: Whittaker dominance diversity index. * indicates significant correlation at 0.05 level; ** indicates highly significant correlation at 0.01 level.

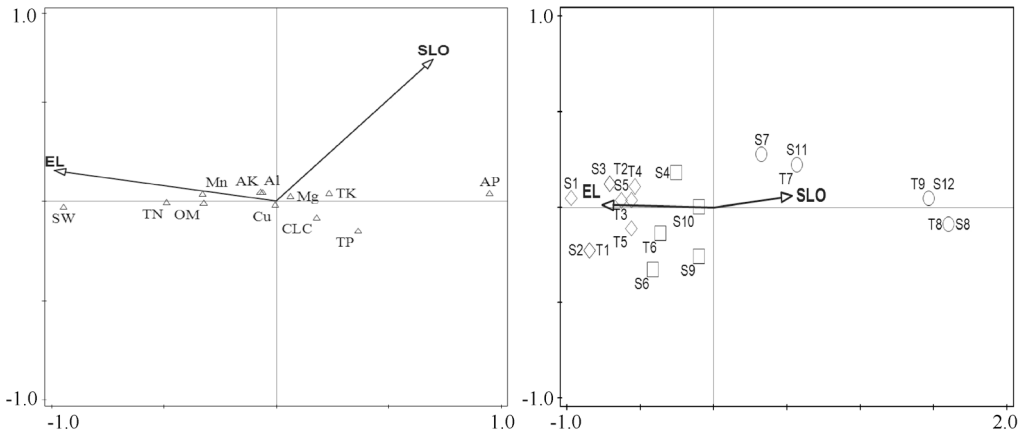


图1 不同海拔梯度土壤理化性质的CCA排序. EL: 海拔; SLO: 坡度; OM: 有机质; TN: 全氮; TP: 全磷; TK: 全钾; AP: 有效磷; AK: 速效钾; SW: 含水率; CLC: 粘土.
Fig. 1 Canonical correspondence analysis of soil physicochemical properties in different perpendicular bands. EL: Elevation; SLO: Slop gradient; OM: Organic matter; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; TK: Total potassium; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium; SW: Water content; CLC: Clay.

磷、全磷、粘土与海拔具有较强的负相关性. 沿第1排序轴, 海拔由高到低依次分布着温带地带性土壤(高山草甸土、暗棕壤、棕壤), 北亚热带地带性土壤(黄棕壤、红棕壤)和亚热带地带性土壤(红壤、山地黄壤), 基本对应气候类型的垂直地带性分异.

3.3 植被群落结构与土壤环境因子之间的关系

对植被群落与土壤环境因子进行典范对应分析, CCA第1排序轴的特征值为0.724 7, 第2排序轴的特征值为0.677 9, 4个轴累计解释了物种-环境关系的82.51%, 前2个轴累计解释了物种-环境关系的59.62% (表6), 说明排序结果良好. 13个土壤环境因子中(图2), 总体上各土壤环境因子箭头与排序轴的夹角角度较大, 相关性强度不明显, 其中锰与CCA第1排序轴呈显著正相关, 铜、铝与CCA第2排序轴呈显著正相

关, 全氮、海拔、含水率、有机质与CCA第1排序轴呈正相关而与CCA第2排序轴呈负相关, 粘土、镁、全磷、全钾、有效磷、速效钾与第1排序轴呈负相关而与CCA第2排序轴呈正相关. 各土壤环境因子之间表现出的相关性规律与皮尔逊分析结果一致. 综合CCA第1、2排序轴的生态学意义, 沿着CCA排序轴从左上方到右下方, 随着海拔梯度的升高, 土壤含水量增加, 土壤有机质和全氮含量增加, 而土壤全钾、全磷、碱解氮、有效磷、镁和土壤粘土含量降低; 沿着CCA第1排序轴从左到右, 锰的含量逐渐增多; 沿着CCA第2排序轴从下到上, 铜、铝的含量逐渐增加.

3.3.1 灌草丛群落与土壤环境因子之间的关系 CCA排序结果大致将灌草丛植被群落分为3类, 即鹅绒委陵菜-扭黄茅群落(S1、S2、S4、S5号样地)、醉浆草-牛尾蒿群落(S3、

S7、S9号样地)和苞茅-紫茎泽兰群落(S6、S8、S10、S11、S12号样地),分别对应海拔梯度3 000-2 500 m、2 800-2 200 m和2 300-1 500 m。排序结果表明,苦蒿、水麻、荨麻、四叶葎、斑茅等位于CCA排序轴的左上端,说明在海拔、土壤含水量较低,粘土、磷、钾含量较高的地方有较多分布,并且对铜、铝具有一定的耐受性,反之位于CCA排序轴右下端的野荞麦、蜈蚣蕨、香茶菜、虎尾草等则在海拔较高,全氮、有机质含量丰富而磷、钾含量较低的土壤环境下有较多分布;三叶鬼针草、老鹳草、香茅、云南冬青和苦芥等位于CCA排序轴的中间区域,说明其生长环境受海拔及土壤影响程度较低,垂直梯度上分布范围较广,在1 500-3 000 m范围内都有分布。

表6 排序特征值和物种与环境的相关性
Table 6 Correlation of sorting characteristic value with species and environment

项目 Item	CCA Axes			
	Axis1	Axis2	Axis3	Axis4
特征值 Eigenvalue	0.7247	0.6779	0.5684	0.5255
物种环境相关性 Correlation between species and environment	0.9173	0.9846	0.9633	0.9024
累积贡献率(r/%) Accumulative contribution rate	35.24	59.62	62.36	82.51

3.3.2 乔木群落与土壤环境因子之间的关系 排序结果表明,沿CCA排序轴,随着海拔由高到低,依次分布着华山松、云南松、柏树、新银合欢和桉树。云南松位于排序轴的右下端,说明其分布在低磷、钾,高氮、有机质的高海拔环境下;新银合欢和桉树沿第1排序轴的左上端排列,说明其在富含磷、钾且土壤质地较细的环境下有较多分布;云南松和柏树位于排序轴的右上端,说明其对铜、锰和铝的耐受性较强。沿着海拔梯度由高到低,依次分布着高山针叶林(T1、T2、T3号样地)、亚高山针叶混交林(T4、T5、T6、T7号样地)和低山阔叶林(T8、T9号样地)。由于滑坡、水土流失等地质灾害和人类不合理的开发利用,山区生态环境严重恶化,高山、亚高山地区原始天然林被人工针叶林所替代,而低山地区土地利用类型则以人工纯林和耕地为主,故在垂直梯度上缺失针阔混交林且阔叶林以桉树和新银合欢为主,麻栎等栎类植物鲜有分布。

3.3.3 灌草丛群落与乔木群落之间的关系 CCA排序图中可以看出,总体上,乔木群落比灌草丛群落对铜、铝、锰等重金属有着更强的耐性,尤其是云南松和柏树,因此排序轴的右上端以乔木群落为主。华山松所处的环境梯度内同时有鹅绒委陵菜、虎尾草、野艾蒿等灌草类植物存在,新银合欢所处的环境梯度内同时有留兰香、牛膝、红蓼等灌草类植物存在,而桉树所处的环境梯度内同时有斑茅、红花洋槐、水麻等灌

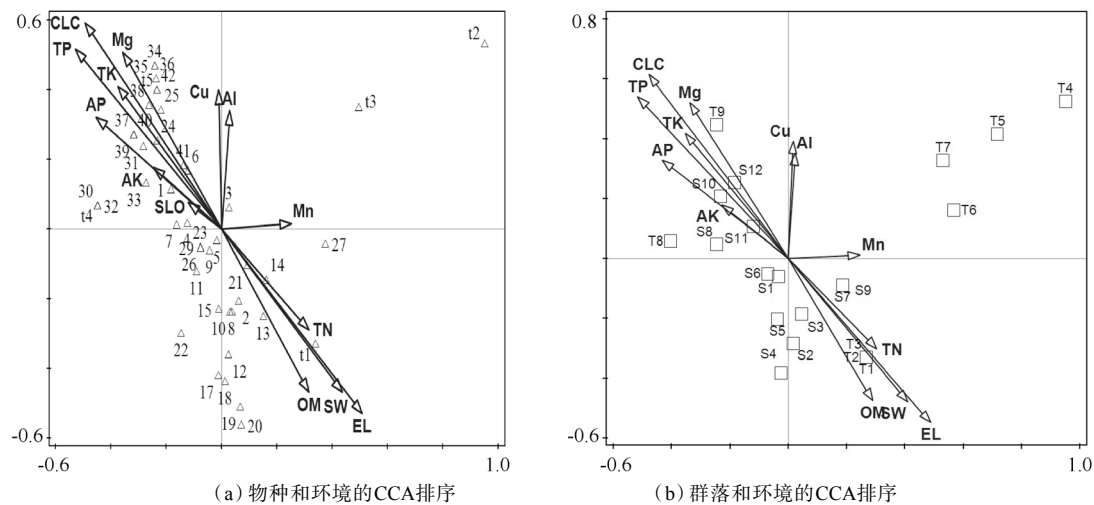


图2 物种(a)/群落(b)与土壤环境的CCA排序。图中仅显示了权重在1%-100%的物种,共计灌草类植物41个,乔木类植物5个。1. 葛草; 2. 鹅绒委陵菜; 3. 三叶鬼针草; 4. 爵床; 5. 老鹳草; 6. 毛茛; 7. 短梗苞茅; 8. 积雪草; 9. 扭黄茅; 10. 苦蕒菜; 11. 美丽胡枝子; 12. 野荞麦; 13. 虎尾草; 14. 野艾蒿; 15. 长叶苕麻; 16. 拟金茅; 17. 蜈蚣蕨; 18. 香茶菜; 19. 山茶花; 20. 七叶一枝花; 21. 牛尾蒿; 22. 苦刺; 23. 香茅; 24. 紫茎泽兰; 25. 醉浆草; 26. 云南冬青; 27. 肾叶山蓼; 28. 新银合欢幼苗; 29. 苦芥; 30. 留兰香; 31. 苦蒿; 32. 牛膝; 33. 红蓼; 34. 斑茅; 35. 红花洋槐; 36. 水麻; 37. 蔓虫豆草; 38. 革命菜; 39. 荨麻; 40. 四叶葎; 41. 野拔子; 42. 邹果苣; t1. 华山松; t2. 云南松; t3. 柏树; t4. 新银合欢; t5. 桉树。EL: 海拔; SLO: 坡度; OM: 有机质; TN: 全氮; TP: 全磷; TK: 全钾; AP: 有效磷; AK: 速效钾; SW: 含水率; CLC: 粘土。

Fig. 2 Canonical correspondence analysis of species (a) and community (b) with soil environmental factors. Only species weighting from 1% to 100% are included. (a): canonical correspondence analysis of species and soil environmental factors; (b): canonical correspondence analysis of community and soil environmental factors. 1. *Arthraxon hispidus*; 2. *Potentilla anserina*; 3. *Bidens pilosa*; 4. *Rostellaria procumbens*; 5. *Geranium wilfordii*; 6. *Ranunculus japonicus*; 7. *Hyparrhenia diplandra*; 8. *Centella asiatica*; 9. *Heteropogon contortus*; 10. *Ixeris dentate*; 11. *Lespedeza formosa*; 12. *Fagopyrum urophyllum*; 13. *Chloris virgata*; 14. *Artemisia lavandulaefolia*; 15. *Boehmeria penduliflora*; 16. *Eulaliopsis binata*; 17. *Pteris vittata*; 18. *Rabdosia amethystoides*; 19. *Camellia japonica* L; 20. *Paris polyphylla*; 21. *Artemisia dubia*; 22. *Solanum deflexicarpum*; 23. *Cymbopogon citratus*; 24. *Eupatorium adenophorum*; 25. *Oxalis corniculata*; 26. *Ilex yunnanensis*; 27. *Oxyria digyna*; 28. *Leucaena leucocephala*; 29. *Fagopyrum tataricum*; 30. *Mentha spicata*; 31. *Acroptilon repens*; 32. *Achyranthes bidentata*; 33. *Polygonum orientale*; 34. *Saccharum arundinaceum*; 35. *Robinia pseudoacacia*; 36. *Fatoua villosa*; 37. *Cajanus scarabaeoides*; 38. *Crassocephalum crepidioides*; 39. *Urtica macrorrhiza*; 40. *Galium bungei*; 41. *Elsholtzia rugulosa*; 42. *Amaranthus viridis*; t1. *Pinus armandii*; t2. *Pinus yunnanensis*; t3. *Cupressus funebris*; t4. *Leucaena leucocephala*; t5. *Eucalyptus robusta*. EL: Elevation; SLO: Slope gradient; OM: Organic matter; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; TK: Total potassium; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium; SW: Water content; CLC: Clay.

表7 不同海拔梯度土壤与植被群落类型

Table 7 Soil and vegetation community types at different evaluations

海拔梯度 Evaluation gradient	土壤类型 Soil type	群落类型 Vegetation type	
		灌草丛群落 Shrub-grassland community	乔木群落 Arbor community
高山Alpine	高山草甸土、暗棕壤、棕壤 Alpine meadow soil; Dark brown soil; Brown soil	鹅绒委陵菜-扭黄茅群落 <i>Potentilla anserine</i> - <i>Heteropogon contortus</i>	高山针叶林 Alpine coniferous forest
亚高山 Subalpine	黄棕壤、红棕壤 Yellow brown soil; Red brown soil	醉浆草-牛尾蒿群落 <i>Oxalis corniculata</i> - <i>Artemisia dubia</i>	亚高山针叶混交林 Subalpine coniferous mixed forest
中山 Middle mountain	红壤、山地黄壤 Red soil; Mountainous yellow soil	苞茅-紫茎泽兰群落 <i>Hyparrhenia bracteata</i> - <i>Eupatorium adenophorum</i>	中低山阔叶林 Low mountain broad-leaved forest
低山 Low mountain	红壤、泥石流堆积物 Red soil; Debris flow deposits	植被类型以耕地和人工阔叶林为主 Cultivated land and Artificial broad-leaved forest mainly	

草类植物存在. 通过CCA分析所得结果与实际调查过程中乔木群落林下植被种类基本一致. 不同海拔梯度下土壤类型、灌草丛群落类型以及乔木群落类型的分布见表7, 本文研究区域主要分布在海拔1 500 m以上的中山、亚高山和高山, 为了保持垂直地带谱的完整性, 经过实地调查, 海拔1 500 m以下的低山地区以人工梯田和泥石流堆积物为主, 植被类型以耕地和人工林为主.

4 结论与讨论

物种分布及其多样性与环境因子的关系受到研究尺度的强烈影响^[25-26], 在大尺度乃至全球性尺度上, 气候是决定植被群落组成、结构和分布的主导因素, 在中等尺度内, 地形因子(海拔、坡度)、土壤理化特征等则起主要作用^[27], 而在较小的尺度内(植被群落), 土壤理化特征与植物组成则存在一定的耦合作用关系, 一方面共同受到地形因素的制约, 另一方面则相互产生影响, 土壤是陆生植被栖息分布的基质, 为植物提供必需的水分和营养物质, 是植被分布的重要影响因子之一^[28-30]. 山地气候和生物的垂直地带性特点, 导致不同地带出现不同的成土作用组合, 最终形成不同的山地土壤^[31]. 土壤水分、土壤质地、有机质以及氮、磷、钾等土壤理化因子和植被群落组成均受到地形垂直梯度变化的显著影响, 类似结果已被许多研究所发现^[32-33], 同时也说明海拔这个综合反映温度、相对湿度以及降水等的地形因子^[34], 在不同尺度的研究中对土壤环境和物种分布及其多样性有重要影响. 不同垂直梯度上的水热状况, 使土壤成土因子产生类似纬度地带性的不同组合, 进而海拔由高到低依次分布有温带地带性土壤、北亚热带地带性土壤和亚热带地带性土壤.

一方面随着海拔梯度的升高, 大气温度降低, 湿润系数增大, 土壤有机质、全氮以及土壤含水量升高, 土壤磷、钾含量逐渐减少, 另一方面人类活动对自然环境的干扰程度随着海拔的升高而降低. 沿着海拔梯度由低到高的方向, 依次分布着苞茅群落、醉浆草-牛尾蒿群落、鹅绒委陵菜-扭黄茅群落等灌草丛群落. 乔木群落中, 由于泥石流频发区原始生态环境破坏严重, 群落类型以人工林为主, 其垂直梯度分布差异性不明显, 但仍大致遵循着高山针叶林-亚高山混交林-低山阔叶林的序列. 尽管不同海拔梯度的原始天然林逐

渐被人工林所替代, 但是其原生物种仍有分布, 因此在今后造林中, 应接近自然的原则, 尽可能遵循高山针叶林、亚高山混交林、低山阔叶林的营林模式.

植被和土壤是泥石流频发区脆弱山地生态系统最受关注的两种资源, 复杂的地形条件和气候类型, 导致土壤环境和植被群落结构的空间异质性较强^[35], 从而降低了生态系统的稳定性, 增加了生态恢复的难度. 13个环境因子的相关性分析表明, 除了海拔梯度外, 土壤有机质、土壤质地、土壤全磷以及铜、铝等金属含量也是影响植被群落格局的限制性因素. 因此在受损生态系统的修复过程中, 必须充分考虑到各种环境因子之间的相互作用, 因地制宜的合理利用自然资源, 制定恢复措施.

参考文献 [References]

1 Guisan A, Zimmermann NE. Predictive habitat distribution models in ecology [J]. *Geol Model*, 2000, **135**: 297-313

2 李英年, 张法伟, 刘安花, 赵亮, 王勤学, 杜远明. 矮嵩草草甸土壤温湿度对植被盖度变化的响应[J]. 中国农业气象, 2006, **27** (4): 265-268 [Li YN, Zhang FW, Liu AH, Zhao L, Wang XQ, Du YM. Responses of soil temperature and humidity to changes of vegetation coverage in Alpine *Kobresia tibetica* meadow [J]. *Chin J Agrometeorol*, 2006, **27** (4): 264-268]

3 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 120-123 [Zhang JT. Quantitative Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2004. 120-123]

4 王世雄, 王孝安, 李国庆, 郭华, 朱志红. 陕西子午岭植物群落演替过程中物种多样性变化与环境解释[J]. 生态学报, 2010, **30** (6): 1638-1647 [Wang SX, Wang XA, Li GQ, Guo H, Zhu ZH. Species diversity and environmental interpretation in the process of community succession in the Ziwu Mountain og Shanxi Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (6): 1638-1647]

5 李军玲, 张金屯. 太行山中段植物群落物种多样性与环境的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2006, **12** (6): 766-771 [Li JL, Zhang JT. Plant species diversity in the middle part of the Taihang Mountain [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2006, **12** (6): 766-771]

6 Gaston KJ. Global patterns in biodiversity [J]. *Nature*, 2000, **405** (6783): 220-227

7 邹翔, 崔鹏, 陈杰, 王道杰. 小江流域土壤抗冲性实验研究[J]. 水土保持学报, 2004, **18** (2): 71-73 [Zou X, Cui P, Chen J, Wang DJ. Experiment study on anti-scouring of soil in Xiaojiang river [J]. *J Soil Water Conserv*,

- 2004, **18** (2): 71-73]
- 8 庄建琦, 葛永刚. 土壤侵蚀对土地利用和降雨变化响应和空间分布特征——以金沙江一级支流小江流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2012, **21** (3): 288-295 [Zhuang JQ, Ge YG. Assessment of the soil loss associated to land use and precipitation change in the Xiaojiang river basin Southwest China [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2012, **21** (3): 288-295]
 - 9 林勇明, 崔鹏, 葛永刚, 王道杰. 蒋家沟流域景观空间格局变化及其干扰效应的模拟分析[J]. 中国水土保持科学, 2010, **8** (6): 32-40 [Lin YM, Cui P, Ge YG, Wang DJ. Simulation analysis of the effect of disturbances on landscape pattern dynamics in Jiangjiagou Watershed [J]. *Soil Water Conserv Sci China*, 2010, **8** (6): 32-40]
 - 10 徐世光, 李长才, 王明珠. 云南小江泥石流与泥石流滩地开发[J]. 地学前缘, 2001, **18** (2): 296-299 [Xu SG, Li CC, Wang MZ. Xiaojiang debris flow and its bottomland exploitation in Yunnan, Southwest China [J]. *Front Earth Sci China*, 2001, **18** (2): 296-299]
 - 11 陈杰, 韦方强, 崔鹏. 小江流域泥石流堆积扇形成的制约因素及其特征[J]. 地理科学, 2005, **25** (6): 704-708 [Chen J, Wei FQ, Cui P. Restricting conditions and their characteristics for debris flow fans in Xiaojiang river valley [J]. *Sci Geogr Sin*, 2005, **25** (6): 704-708]
 - 12 王道杰, 崔鹏, 朱波, 王玉宽. 金沙江干热河谷植被恢复技术及生态效益[J]. 水土保持学报, 2004, **18** (5): 95-98 [Wang AJ, Cui P, Zhu B, Wang YK. Vegetation rehabilitation techniques and ecological effects in Dry-Hot Valley of Jingsha River [J]. *J Soil Water Conserv*, 2004, **18** (5): 95-98]
 - 13 杜荣桓, 康志成, 陈循谦, 朱平一. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987 [Du RH, Kang ZC, Chen XQ, Zhu PY. A Comprehensive Investigation and Control Planning for Debris Flow in the Xiaojiang River Basin of Yunnan Province [M]. Chongqing: Scientific and Technological Literature Press Chongqing Branch, 1987]
 - 14 董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1997. 12-86 [Lu M. Survey, Observation and Analysis of Terrestrial Biocommunities [M]. Beijing: China Standard Press, 1997. 12-86]
 - 15 严旭升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1998. 123-174 [Yan XS. Research Method of Soil Fertility [M]. Beijing: Agriculture Press, 1998. 123-174]
 - 16 岳明, 周虹霞. 太白山北坡落叶阔叶林物种多样性特征[J]. 云南植物研究, 1997, **19** (2): 171-176 [Yue M, Zhou HX. Diversity of higher plants in deciduous broadleaved forests on the northern slope of Taibai Mountain [J]. *Acta Bot Yunnan*, 1997, **19** (2): 171-176]
 - 17 郑敬刚, 董东平, 赵登海, 何明珠, 李新荣. 贺兰山西坡植被群落特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2008, **28** (9): 4559-4567 [Zheng JG, Dong DP, Zhao DH, He MZ, Li XR. Relationship between vegetation community characteristics and its environmental factors in the west slope of Helan Mountain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (9): 4559-4567]
 - 18 揣小伟, 黄贤金, 赖力, 张梅. 基于GIS的土壤有机碳储量核算及其对土地利用变化的响应[J]. 农业工程学报, 2011, **27** (9): 1-6 [Chuai XW, Huang XJ, Lai L, Zhang M. Accounting of surface soil carbon storage and response to land use change based on GIS [J]. *Trans CSAE*, 2011, **27** (9): 1-6]
 - 19 王学佳, 杨梅学, 万国宁. 藏北高原D105点土壤冻融状况与温湿特征分析[J]. 冰川冻土, 2012, **34** (1): 56-63 [Wang XJ, Ysng MX, Wan GN. Processes of soil Thawing-Freezing and features of ground temperature and moisture at D105 on the Northern Tibetan Plateau [J]. *J Glaciol & Geocryol*, 2012, **34** (1): 56-63]
 - 20 赵长明, 高贤良, 马仁义, 陈立同, 陈拓, 任贾文. 祁连圆柏和青海云杉幼苗生理生态特征对土壤干旱胁迫的响应[J]. 冰川冻土, 2012, **34** (1): 147-154 [Zhao CM, Gao XL, Ma RY, Chen LT, Chen T, Ren JW. Responses of *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* seedlings to different draught stress of soil in ecophysiological characteristics [J]. *J Glaciol & Geocryol*, 2012, **34** (1): 147-154]
 - 21 王一博, 王根绪, 吴青柏, 牛富俊, 程慧燕. 植被退化对高寒土壤水文特征的影响[J]. 冰川冻土, 2010, **32** (5): 989-998 [Wang YB, Wang GX, Wu QB, Niu FJ, Cheng HY. The impact of vegetation degeneration on hydrology features of alpine soil [J]. *J Glaciol & Geocryol*, 2010, **32** (5): 989-998]
 - 22 王娇月, 宋长春, 王宪伟, 王丽丽. 冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, **33** (2): 442-452 [Wang JY, Song CC, Wang XW, Wang LL. Progress in the study of effect of freeze-thaw process on the organic carbon pool and microorganisms in soils [J]. *J Glaciol & Geocryol*, 2011, **33** (2): 442-452]
 - 23 王增如, 杨国靖, 何晓波, 武震, 王杰, 赵求东, 赵传成, 叶柏生. 长江源区植物群落特征与环境因子的关系[J]. 冰川冻土, 2011, **33** (3): 640-645 [Wang ZR, Yang GJ, He XB, Wu Z, Wang J, Zhao QD, Zhao CC, Ye LS. Relationship between plant community and environmental factors in the source regions of Yangtze River [J]. *J Glaciol & Geocryol*, 2011, **33** (3): 640-645]
 - 24 吴雅琼, 刘国华, 傅伯杰, 郭玉华. 青藏高原土壤有机碳密度垂直分布研究[J]. 环境科学学报, 2008, **28** (2): 362-367 [Wu YQ, Liu GH, Fu BJ, Guo YH. Study on the vertical distribution of soil organic carbon density in Tibetan Plateau [J]. *Acta Sci Circumst*, 2008, **28** (2): 362-367]
 - 25 Kunin WE. Extrapolating species abundance across spatial scales[J]. *Science*, 1998, **281** (5382): 1513-1515]
 - 26 孟斌, 王劲峰. 地理数据尺度转换方法研究进展[J]. 地理学报, 2005, **60** (2): 277-288 [Meng B, Wang JF. A review on the methodology of scaling with Geo-Data [J]. *Acta Geogr Sin*, 2005, **60** (2): 277-288]
 - 27 Woodward F I, Mckee IF. Vegetation and climate [J]. *Environ Intern*, 1991, **17** (6): 535-546]
 - 28 郭然, 王效科, 逯非, 段晓男, 欧阳志云. 中国草地土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, **28** (2): 862-867 [Guo R, Wang XK, Lu F, Duan XN, Oyang ZY. Soil carbon sequestration and its potential by grassland ecosystem in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (2): 862-867]
 - 29 鲍新奎, 曹广民, 高以信. 草毡表层的形成环境和发生机理[J]. 土壤学报, 1995, **32** (1): 45-52 [Bao XK, Cao GM, Gao YX. The environmental and mechanism of mattic epipedon [J]. *Acta Pedol Sin*, 1995, **32** (1): 45-52]
 - 30 李英年, 王勤学, 杜明远, 赵亮, 徐世晓, 唐艳鸿, 于贵瑞, 赵新全, 古松. 寒冻锥形土有机质补给、分解及大气CO₂通量交换[J]. 草地学报, 2006, **14** (2): 165-169 [Li YN, Wang QX, Du MY, Zhao L, Xu SX, Tang YH, Yu GR, Zhao XQ, Gu S. A study on replenishment and decomposition of organic matter in and Mat-Crylic cambisols CO₂ flux between vegetation and atmosphere [J]. *Acta Agrestia Sin*, 2006, **14** (2): 165-169]
 - 31 苏文才. 论土壤分布的垂直地带性地理规律[J]. 河南师范大学学报, 1980 (2): 117-128 [Su WC. Vertical zonal geographic patterns of soil distribution [J]. *J Henan Univ*, 1980 (2): 117-128]

- 32 冯云, 马克明, 张育新, 祁建. 辽东栎林不同层植物沿海拔梯度分布的DCCA分析[J]. 植物生态学报, 2008, **32** (3): 568-573 [Feng Y, Ma KM, Zhang YX, Qi J. DCCA analysis of plant species distribution in different strata of OAK (*Quercus uaotungensis*) forest along an altitudinal gradient in Dongling Mountain, China [J]. *J Plant Ecol*, 2008, **32** (3): 568-573]
- 33 于顺利, 马克平, 徐存宝, 徐存宝, 金淑芳, 宋晓兵, 陈灵芝. 环境梯度下蒙古栎群落的物种多样性特征[J]. 生态学报, 2004, **24** (12): 2932-2939 [Yu SL, Ma KP, Xu CB, Jin SF, Song XB, Chen LZ. The species diversity characteristics comparison of *Quercus mongolica* community along environmental gradient factors [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24** (12): 2932-2939]
- 34 Huston MA. Biological Diversity: The Coexistence of Species in Changing Landscapes [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994
- 35 於琨, 李克让, 陶波, 徐明. 植物地理分布对气候变化的适应性研究[J]. 地理科学进展, 2010, **29** (11): 1326-1332 [Yu L, Li KR, Tao B, Xu M. Simulating and assessing the adaptability of geographic distribution of vegetation to climate change in China [J]. *Progr Geogr*, 2010, **29** (11): 1326-1332]



《保护生物学》

从书名: 新生物学丛书 ISBN: 978-7-03-040461-9/Q•3288 开本: 16 定价: 280 作者: (美) 普里马克 R.B., 马克平, 蒋志刚

内容简介

本书编译自Richard B. Primack编写的Essentials of Conservation Biology (第五版), 系统阐述了保护生物学的范畴、主要内容和发展历程, 生物多样性的概念、分布和价值, 生物多样性面临的威胁及其引起的物种丧失和灭绝, 种群和物种水平的保护, 生态系统和景观水平的保护与恢复, 生物多样性保护与社会经济可持续发展。全书内容丰富、知识系统、逻辑合理、层次清晰, 已经被翻译成25种语言, 是目前国际上最受欢迎的保护生物学教科书。

从这本新版的《保护生物学》中, 读者可以了解到保护生物学及其发展历程、什么是生物多样性、生物多样性的现状、生物多样性丧失的原因、如何保护和恢复生物多样性, 面临的挑战和可能的解决方案, 以及目前这一领域的主要进展, 特别是国际社会的努力。希望读者通过《保护生物学(译)》, 对保护生物学有更加全面和深刻的认识, 也希望《保护生物学(译)》对于政府和民众保护和可持续利用生物多样性的行动有所帮助。

《生态文化概论》

ISBN: 978-7-03-040677-4/Q•3312 开本: 16 定价: 88 作者: 吴章文

内容简介

本书撰写了地球陆地生态系统中的森林文化、草原文化、湿地文化和海洋生态系统中的海洋文化。因森林文化历史悠久、内涵丰富、类型多样, 书中特对森林文化中的自然保护区文化、森林公园文化、绿道文化、竹文化单独叙述。

订购方式1: 网上购书

淘宝商城科学出版社旗舰店: <http://kxcbs.tmall.com/>; 卓越亚马逊: <http://www.amazon.cn/>;

当当网: <http://www.dangdang.com/>; 京东图书: <http://book.jd.com/>

订购方式2: 电话购书

联系人: 科学出版社 贾海涛 13501022258 010-64017321

订购方式3: 邮件购书

生物分社: lifescience@mail.sciencep.com; 贾海涛: jiahaitao@mail.sciencep.com