

伊犁河谷山地北坡土壤特性及植被群落 多样性垂直分布格局

杨瑞红^{1,2,3}, 王新军¹

(1. 新疆农业大学, 乌鲁木齐 830052; 2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所,
乌鲁木齐 830011; 3. 新疆教育学院, 乌鲁木齐 830043)

摘 要:基于对伊犁河谷山地北坡垂直地带植被多样性和土壤生境的调查分析数据,采用 Pearson 相关系数法、主成分法和 DCA 排序法分析了物种多样性指数与环境因子之间的关系。结果表明:根据其植被带和土壤带沿不同海拔将其分为针叶林、山地草原、落叶阔叶林和荒漠草原;其总的物种丰富度和 Simpson 指数与海拔呈现先升高后降低,再升高的格局,不同海拔植被群落丰富度指数之间差异均显著($p < 0.05$),Shannon-Wiener 指数随海拔的增加呈先增加后降低的趋势,Pielou 均匀度指数随海拔的增加呈先降低后增加,然后降低的格局。伊犁河谷山地北坡土壤有机质和有效氮含量随海拔的增加而增加的趋势,基本表现为针叶林>山地草原>落叶阔叶林>荒漠草原,其中不同海拔植被群落土壤有机质含量之间差异均显著($p < 0.05$),土壤有效磷含量没有明显的垂直变化规律,土壤有效钾含量随海拔的增加呈先增加后降低的趋势,基本表现为山地草原>针叶林>落叶阔叶林>荒漠草原。伊犁河谷山地北坡土壤 pH 值随海拔的增加而降低的趋势,基本表现为荒漠草原>山地草原>落叶阔叶林>针叶林,土壤电导率、全盐和总盐含量均随海拔的增加呈先增加后降低的格局,基本表现为山地草原>落叶阔叶林>荒漠草原>针叶林。主成分的结果分析表明,第一主成分负荷值最高的分别为土壤全盐、总盐、电导率,可称为土壤盐分因子;第二主成分负荷值最高的分别为土壤有效氮、有机质和 pH 值,可称为保肥、供肥因子。DCA 排序结果表明,沿着 DCA 第一轴,随着海拔逐渐降低,土壤有机质、有效氮和有效钾等土壤养分的含量逐渐下降,而 pH 值和电导率逐渐上升;沿着 DCA 第二轴,随着海拔逐渐降低,土壤总盐和全盐含量逐渐增加,而土壤有效磷含量却逐渐降低。由此可知,伊犁河谷山地北坡植物群落多样性的垂直分布格局是由海拔为主的多种环境因子综合作用的结果,而土壤养分和盐分随海拔的变化与植被带不尽一致,可能它们之间的同步变化存在一定的滞后期。

关键词:伊犁河谷; 土壤特性; 群落多样性; 垂直格局

中图分类号:S153.6;Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0032-08

The Vertical Distribution of Vegetation Patterns and Soil Properties at the Northern Slope of Ili River Valley

YANG Ruihong^{1,2,3}, WANG Xinjun¹

(1. Xijiang Agriculture University, Urumqi 830052, China; 2. Xingjiang Institute of Ecology and Geography,
Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3. Xinjiang Education Institute, Urumqi 840043, China)

Abstract:Based on a survey of sample plots in the study area, DCA, Pearson and principal component were used to analyze the relationships between diversity indices and soil properties, which were located on the north slopes of the Iri Valley, Xinjiang, China. The results are as follows. (1) The vegetation types were divided into coniferous forest, mountain meadow, broadleaved deciduous forest and desert steppe according to the vegetation habitats and soils along the elevation. The species richness and Simpson index first increased and then decreased, then increased with the increasing elevation, which had the significant difference in different elevations ($p < 0.05$), and Shannon-Wiener index increased and then decreased with the increasing elevation and Pielou evenness index decreased and then increased then decreased. (2) Soil organic matter and available nitrogen content increased with the increase of elevation with the sequence of coniferous

收稿日期:2016-04-03

修回日期:2016-04-19

资助项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金“梭梭、怪柳群落土壤微生物量 C/N 特征及其生态效应(2014211B014)”

第一作者:杨瑞红(1980—),女,新疆和静县人,博士研究生,主要研究领域:环境与土壤生态学研究。E-mail:Ruihong_yang80@163.com

forest>mountain meadow>broadleaved deciduous forest>desert steppe, which had a significant difference in different elevations ($p<0.05$), while the content of available phosphorus had no significant difference in different elevations ($p>0.05$), and the content of available potassium first increased and then decreased with the increase of elevation. (3) The soil pH gradually decreased with the increase of elevation with the sequence of desert steppe>mountain meadow>broadleaved deciduous forest>coniferous forest, and the soil conductivity, contents of salt and total salt first increased and then decreased with the sequence of mountain meadow>broadleaved deciduous forest>desert steppe>coniferous forest. (4) The principal component analysis showed that the first principal components were total salt, electric conductivity, soil total salt, which might be referred to as the soil salinity factor, and the second principal components were soil effective nitrogen, organic matter and pH value, respectively, which might be referred to as soil fertilizer factors. (4) DCA sorting results indicated that with the gradual decrease of elevation, the soil organic matter, available nitrogen and available potassium decreased gradually, while pH and conductivity increased in the first axis of DCA, and the soil total salt increased gradually, and the soil available phosphorus gradually reduced in the second axis of DCA. (5) To sum up, these patterns were formed by the synthetic action of a variety of environmental factors among which elevation played an important role, and the vertical distribution of vegetation patterns and soil properties were not same indicating that there was the potential lag.

Keywords: Ili River Valley; soil properties; vegetation patterns; altitude pattern

土壤是生态系统中的重要组成部分,作为重要的自然资源维持着生态系统健康和稳定,其中土壤各因子能供应和协调植物的生长^[1-2];植被多样性是植被结构因子之一,也是植被维持稳定的重要方面,其多样性分布格局是各生态环境因子综合反映的结果,因此,生态环境因子与物种多样性格局一直是生态学研究热点^[3-4]。地球表面不同的环境因子导致了地表植物及其分布特征,而物种多样性沿环境梯度的变化规律是生物多样性研究的重要内容^[5]。地形因子、海拔因子和土壤因子对物种多样性格局显示了多方面和多尺度的影响,包含温度、湿度、光照和土壤属性等直接生境因子的多尺度变化,影响着植物群落的分布与结构及物种多样性^[6-8];不同山地物种多样性海拔分布格局可能与环境条件、相对高度、地貌类型、土壤因子等相关,而海拔梯度则是综合了温度、湿度、光照等多种环境因子而成为物种多样性梯度格局研究的重要方面^[6-7,9]。基于样方尺度的物种多样性沿海拔梯度分布格局,研究植物群落物种多样性的梯度格局以及控制这些格局的生态因子,有利于揭示群落结构和物种多样性分布格局以及进一步了解植物群落的生态学过程^[9-10]。因此,对山地进行物种多样性海拔格局及其对环境因子响应的研究显得非常有必要。

因此,本文以伊犁河谷山地北坡植物群落样方调查和土壤测定数据为基础,分析整个群落的物种多样性、土壤养分和盐分在海拔梯度上的分布格局,探讨影响群落中各生活型及总体物种多样性分布格局的关键性环境因子,不仅可以为当地植被与植物资源的保护

与利用提供重要的科学依据,亦将深化河谷区山地植被与环境关系研究的基础科学理论,为河谷区山地植被与环境关系、山地退化植被的修复提供基础性数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

伊犁河谷为一相对沉降的山间谷地,西部敞开,南北东 3 面雪山耸立;向东变狭,地势隆起,常形成丰富的地形雨,谷地两侧山地中山带降雨量可达 800 mm 以上,为山地森林和草甸植被的发育提供了优越的生态环境,成为天山山地中植被最发达的地方。研究地位于新疆北天山西段,西接别珍套山,东与婆罗科努山相连,北靠准噶尔盆地,南临伊犁河谷,面积 3 600 km²,年平均气温 2.8~9.2℃,≥10℃积温 1 326~3 300℃,无霜期 80~160 d,平均日照时数 2 898.4 h,山脉分水岭脊线海拔高度 4 000 m 左右,山顶积雪终年不化^[9,11-12]。

1.2 试验设计

1.2.1 样地设置及调查 采用典型样地法对在伊犁河谷北坡(81.518°—82.075°E,44.134°—44.432°N,海拔 1 128~2 134 m)植被进行调查,采样时间为 2014—2015 年 8 月中旬,数据为连续 2 a 的平均值(每年定点采样),选择具有代表性的植物群落进行样地调查。调查范围从山顶到山前荒漠草原带,根据其植被带和土壤带沿不同海拔将其分为针叶林、山地草原、落叶阔叶林和荒漠草原,每个植被带设置 5 个样地,而在物种特别丰富的海拔增设 1~2 个样地,每个样地分别设置 10 个草本、灌木和乔木样方,其中,乔

木样地面积为 $15\text{ m} \times 15\text{ m}$, 灌木样地及草本样地的面积分别为 $8\text{ m} \times 8\text{ m}$ 和 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$; 分层调查乔木、灌木及草本, 调查内容包括乔木和灌木的多度、高度及冠幅, 草本的高度及盖度; 同时用 GPS 记录每个样地的海拔和经纬度。

多样性指数主要用来反映植物的丰富程度, 是植物丰富度和均匀程度的综合反映, 多样性指数越高, 植被的物种多样性越丰富。均匀度是植物分布均匀程度的反映, 在一个植被中, 各个种的相对密度越均匀, 即各物种的个体数很接近, 均匀度值越高。丰富度是植被物种多样性丰富程度的反映, 当个体数量一定时, 物种数越多, 对每个样地分别计算乔木、灌木和草本的重要值, 其公式如下^[14]:

乔木、灌木 = (相对多度 + 相对高度 + 相对盖度) / 3

草本 = (相对高度 + 相对盖度) / 2

多样性指数计算公式如下:

Patrick 丰富度指数(S)

Shannon-Wiener 多样性指数(H): $H = -\sum P_i \ln P_i$

Simpson 优势度指数(D): $D = 1 - \sum (P_i)^2$

Pielou 均匀度指数(JP):

$JP = -\sum P_i \ln P_i / \ln S$; $JP = H / \ln S$

式中: S 代表样方内物种数目; P_i 为样方内种的相对重要值; 相对重要值(P_i) = (相对覆盖度 + 相对高度 + 相对多度) / 3。

按照以上公式计算各层的多样性指数。根据群落垂直结构的特点, 在测度群落总体多样性指数时, 对不同生长型的多样性指数进行加权, 权重为不同生长型的相对盖度和叶层的相对厚度之和的平均值, 其公式为^[9,14]:

$$W_i = (C_i + h_i) / 2$$

式中: C 为群落的总盖度($C = \sum C_i$) ($i=1$, 表示乔木层; 2 表示灌木层; 3 表示草本层; 下同); h 为群落各生长型的平均高度($h = \sum h_i$); W_i 为群落第 i 个生长型多样性指数的加权参数, C_i 为第 i 个生长型的盖度; h_i 为第 i 个生长型的平均高度。其中, 乔木层的叶层(林冠)厚度按乔木层高度的 1/3 计算, 灌木层按 1/2 计算, 草本层按草本层高度 100% 计算, W_i 计算结果为:

乔木层加权参数 $W_1 = 0.394$; 灌木层加权参数 $W_2 = 0.116$; 草本层加权参数 $W_3 = 0.490$

群落总体多样性指数按照以下公式计算: $D = W_1 D_1 + W_2 D_2 + W_3 D_3$, 式中, W_1, W_2, W_3 分别为乔木层、灌木层、草本层的加权参数; D_1, D_2, D_3 分别为乔木层、灌木层、草本层的多样性指数。

最后采用公式: $D_i' = (D_i - D_{\min}) / (D_{\max} - D_{\min})$

对全部多样性指数做归一化处理, 得到 0—100 的区间值, 式中, D_i' 为归一化处理之后的多样性数值, D_i , D_{\min} , D_{\max} 分别为乔木层、灌木层、草本层、群落总体的一组多样性指数里面的原始值、最小值和最大值。

1.2.2 土壤样品采集 为了保证取样的一致性, 所取样的土壤坡度均小于 5° , 在每个植物样方内采用四分法取样(保留 1 kg 左右), 按“S”形多点采样法在每个样方用无菌小铁铲采集 0—40 cm 混合土壤(主要是表层土壤, 本研究中所取得土壤样品主要是草本、灌木和乔木, 由于乔木和灌木样方有枯落物层占了差不多 10—15 cm, 因此, 取得 0—40 cm 的土壤混合后代表这个样方的土壤特性值), 采样时除去土壤表面动植物残体, 所采土壤样品充分混匀后用聚乙烯无菌塑料袋密封包好, 并迅速带回实验室内分析测定, 自然风干(20 d)去除碎片和部分根后过 0.5 mm 筛测定土壤养分及盐分。

1.2.3 土壤样品的测定 土壤养分跟盐分含量的测定: pH 采用电极电位法(1:2.5 土水比); 土壤电导率(5:1 水土比浸提液, $\mu\text{S}/\text{cm}^2$) 采用 P4 多功能测定仪测定; 总盐用烘干残渣法(%), 全盐用标准曲线换算法; 土壤有机质用重铬酸钾容量法—外加热法(g/kg); 土壤有效氮(mg/kg)用全自动凯氏定氮法; 有效磷(mg/kg)采用 NaHCO_3 浸提—钼锑抗比色法测定; 有效氮(mg/kg)采用 $\text{NaOH}-\text{H}_3\text{BO}_3$ 法测定; 有效钾(mg/kg)采用火焰分光光度法^[15]。

1.3 数据处理与分析

Excel 2013 和 SPSS 21.0 进行数据统计和方差检验, 以平均值 ± 标准误差表示 (Mean ± SE), 单因素方差分析 (One-way ANOVA), Pearson 相关系数法分析土壤养分和植被多样性之间的相关性, CANOCO 4.5 分析土壤因子对植被多样性与环境因子的响应。

2 结果与分析

2.1 伊犁河谷山地北坡垂直地带植被分布特征

每种群落类型主要环境因子的特征值(所属同一类型样地的环境因子的平均值)及优势种见表 1, 由表 1 可知, 伊犁河谷山地北坡群落选取样地总数为 20 个, 每个样地样方大于 30 (其中草本、灌木和乔木分别大于 10), 共调查到植物种 143 种, 其中乔木 6 种、灌木 15 种、草本 108 种, 调查到的群落类型基本涵盖了沿海拔上升的群落和土壤类型, 我们根据其植被带和土壤带沿不同海拔将其分为 4 种群落类型, 主要包括针叶林、山地草原、落叶阔叶林和荒漠草原, 其中针叶林以雪岭云杉(*Picea schrenkiana*) 为建群种, 占据绝对优势; 山

地草原建群种为草原糙苏(*Phlomis pratensis*),伴生有针茅(*Stipa capillata*)、阿尔泰百里香(*Thymus altai-cus*)、千叶蓍(*Achillea millefolium*)、雀麦(*Bromus japonicus*)、早熟禾(*Poa supina*)等草本植物,占据的海拔范围也是最宽;落叶阔叶林主要是野果林群落,以野杏(*Armeniaca vulgaris*)为建群种,伴生有天山樱桃(*Cerasus tianschanica*)、天山桦(*Betula tianschanica*)、美丽木蓼(*Atraphaxis decipiens*)、复盆子(*Rubus idae-*

us)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、天山花楸(*Sorbus tianschanica*)、黄果山楂(*Crataegus chlorocarpa*)等;荒漠草原仅有草本植物,结构相对简单,灌木和乔木只有零星分布,以建群种为主的叶元胡(*Corydalis lede-bouraiana*),伴生灰毛糖芥(*Erysimum diffusum*)、芨芨草(*Achnatherum splenden*)、东方旱麦草(*Eremopy-rum orientale*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、狗牙根、新疆亚菊(*Ajania fastigiata*)。

表 1 伊犁河谷山地北坡垂直地带植被分布特征

海拔/m	群落类型	土壤类型	土壤母质	腐殖质厚度/cm	含水量/%	主要优势种
>2100	针叶林	山地森林土	黄土	20~30	12~16	雪岭云杉
1600~2100	山地草原	栗钙土	丘陵土	10~30	8~10	针茅、草原糙苏
1200~1600	落叶阔叶林	暗栗钙土	山地黄土	>30	15~18	野杏
<1200	荒漠草原	灰钙土	黄土	5~15	5~9	芨芨草

2.2 犁河谷山地北坡植被多样性指数分布格局

由图 1 可知,犁河谷山地北坡总的物种丰富度和 Simpson 指数与海拔呈现先升高后降低,再升高的格局,不同海拔植被群落丰富度指数之间差异均显著($p<0.05$),基本表现为针叶林>落叶阔叶林>山地草原>荒漠草原,其变化范围为 15.2~28.3;不同海拔植被群落 Simpson 指数基本表现为针叶林>落叶阔叶林>山地草原>荒漠草原,其变化范围为 0.56~1.23,其中针叶林和落叶阔叶林差异不显著($p>0.05$),山地草原和荒漠草原差异不显著($p>0.05$),二者显著低于针叶林和落叶阔叶林($p<0.05$);

Shannon-Wiener 指数随海拔的增加呈先增加后降低的趋势,基本表现为落叶阔叶林>山地草原>针叶林>荒漠草原,其变化范围为 1.98~3.52,落叶阔叶林和山地草原显著高于针叶林和荒漠草原($p<0.05$),而针叶林和荒漠草原差异并不显著($p>0.05$);Pielou 均匀度指数随海拔的增加呈先降低后增加,然后降低的格局,其变化范围为 0.85~1.24,基本表现为山地草原>荒漠草原>落叶阔叶林>针叶林,其中山地草原和荒漠草原差异不显著($p>0.05$),二者显著高于落叶阔叶林和针叶林($p<0.05$),落叶阔叶林和针叶林之间差异显著($p<0.05$)。

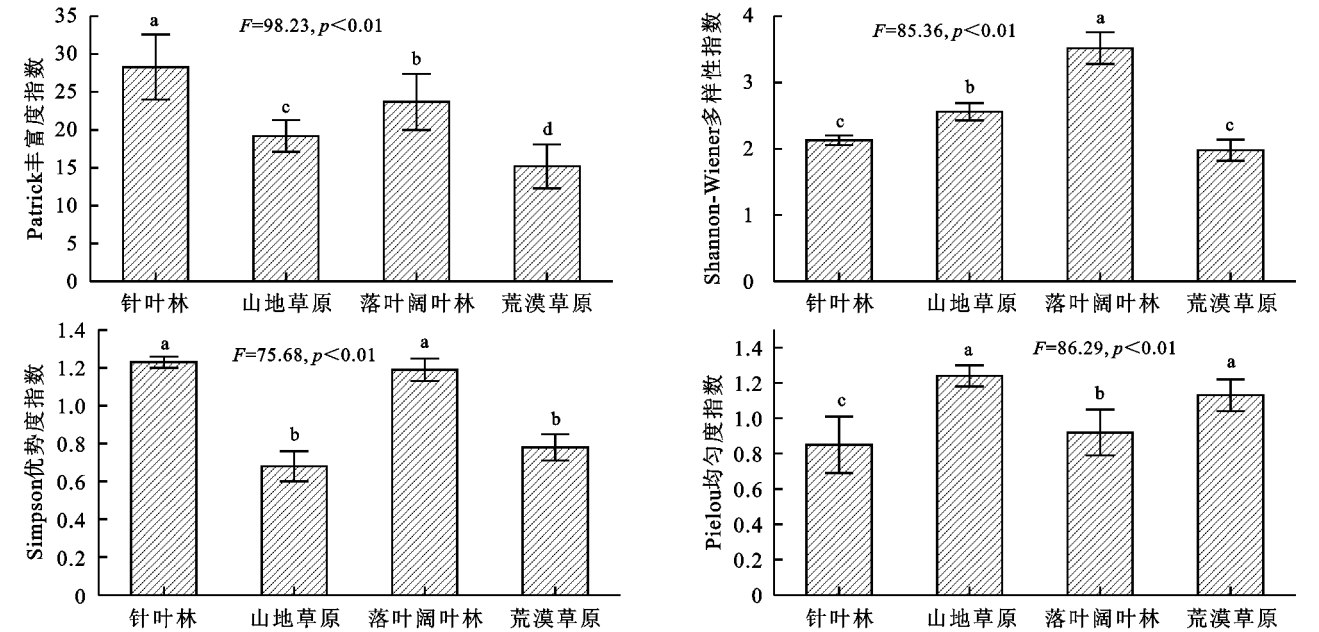


图 1 犁河谷山地北坡植被多样性指数分布格局

2.3 伊犁河谷山地北坡土壤养分分布格局

土壤养分是土壤固相的重要组成部分,与土壤矿物质部分共同作为营养来源,对于提高土壤肥力具有重要的作用^[16]。由图 2 可知,犁河谷山地北坡土壤有机质含

量变化在 21.4~86.6 g/kg,随海拔的增加而增加,基本表现为针叶林>山地草原>落叶阔叶林>荒漠草原,其中不同海拔植被群落土壤有机质含量之间差异均显著($p<0.05$);犁河谷山地北坡土壤有效氮含量变化在

123~294 mg/kg,随海拔的增加而增加,基本表现为针叶林>山地草原>落叶阔叶林>荒漠草原,其中针叶林显著高于其他群落类型($p<0.05$),山地草原和落叶阔叶林之间差异不显著($p>0.05$),荒漠草原最低($p<0.05$);犁河谷山地北坡土壤有效磷含量变化在 17.5~20.6 mg/kg,没有明显的垂直变化规律,总体上看,随海拔的增加呈逐渐降低的趋势,基本表现为荒漠草原>山

地草原>针叶林>落叶阔叶林,其中不同海拔植被群落土壤有效磷含量之间差异均显著($p>0.05$);犁河谷山地北坡土壤有效钾含量变化在 235~352 mg/kg,随海拔的增加呈先增加后降低的格局,基本表现为山地草原>针叶林>落叶阔叶林>荒漠草原,其中山地草原最高($p<0.05$),针叶林和落叶阔叶林之间差异并不显著($p>0.05$),荒漠草原最低($p<0.05$)。

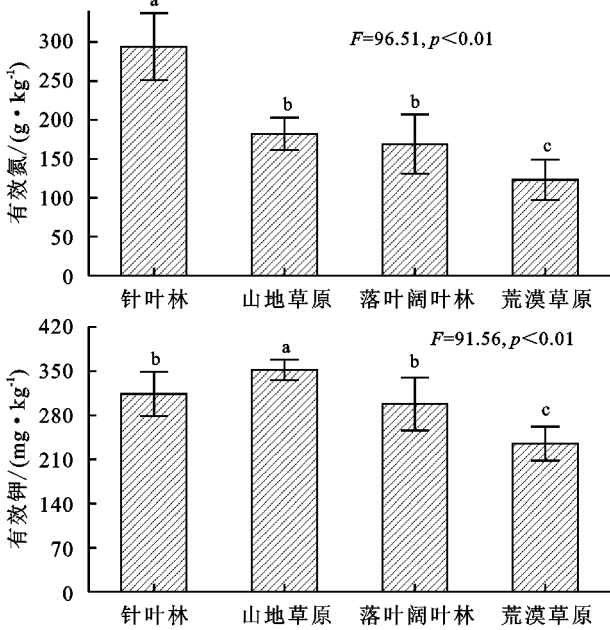
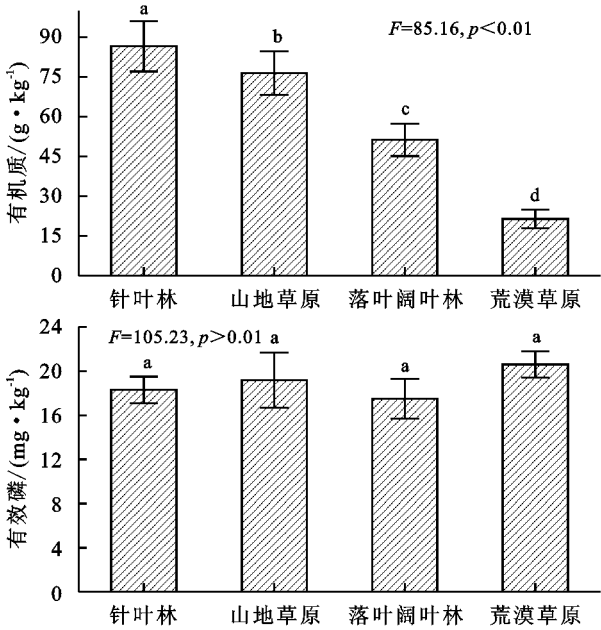


图 2 伊犁河谷山地北坡土壤养分格局

2.4 伊犁河谷山地北坡土壤盐分分布格局

土壤酸碱度是土壤的重要化学性质之一,直接影响作物的生长和微生物的活动以及土壤的其他性质和肥力状况^[17]。由图 3 可知,犁河谷山地北坡土壤 pH 值变化在 6.53~7.35,随海拔的增加而降低,基本表现为荒漠草原>山地草原>落叶阔叶林>针叶林,其中荒漠草原显著高于其他海拔群落类型($p<0.05$),山地草原和落叶阔叶林之间差异不显著($p>0.05$),荒漠草原显著低于其他海拔群落类型($p<0.05$);犁河谷山地北坡土壤电导率变化在 0.59~0.73 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$,随海拔的增加呈先增加后降低的格局,基本表现为山地草原>落叶阔叶林>荒漠草原>针叶林,其中不同海拔群落类型土壤电导率之间差异均不显著($p>0.05$);犁河谷山地北坡土壤总盐变化在 0.63%~1.23%,随海拔的增加呈先增加后降低的格局,基本表现为山地草原>针叶林>落叶阔叶林>荒漠草原,其中山地草原显著高于其他海拔群落类型($p<0.05$),针叶林和落叶阔叶林之间差异不显著($p>0.05$),荒漠草原显著低于其他海拔群落类型($p<0.05$);犁河谷山地北坡土壤全盐变化在 0.58%~1.15%,随海拔的增加呈先增加后降低的格局,基本表现为山地草原>针叶林>

落叶阔叶林>荒漠草原,其中山地草原和落叶阔叶林显著高于其他海拔群落类型($p<0.05$),针叶林和荒漠草原之间差异不显著($p<0.05$),二者显著低于山地草原和落叶阔叶林($p<0.05$)。

2.5 伊犁河谷山地北坡土壤因子主要影响因子分析

本研究中以土壤因子作为原变量,通过计算变量方差和协方差矩阵的特征量,将多个变量通过降维对土壤因子信息进行集中和提取,识别出起主导作用的土壤因子。表 2 是各重金属含量的总方差分解表,可以看出第一、第二主成分特征值占总方差的百分比已经大于 93.91%,即前两个主成分对 8 个指标所涵盖的大部分信息进行了概括,其中第一主成分携带的信息最多,达到 78.36%,第一、第二主成分的累计贡献率达到 93.91%,而主成分 3,4 对总方差的贡献很小,因此,选取前 2 个因子作为主成分,对应的数值是其荷载值,反映了主成分与变量的相关系数,载荷值大的即可认为是重要因子。由表 2 可知,第一主成分对原始变量的解释贡献了总方差的 78.36%,负荷载最高的几个指标分别为土壤全盐、总盐、电导率,第二主成分对原始变量的解释贡献了总方差的 93.91%,负荷载最高的几个指标分别为土壤有效氮、有机质和 pH 值。

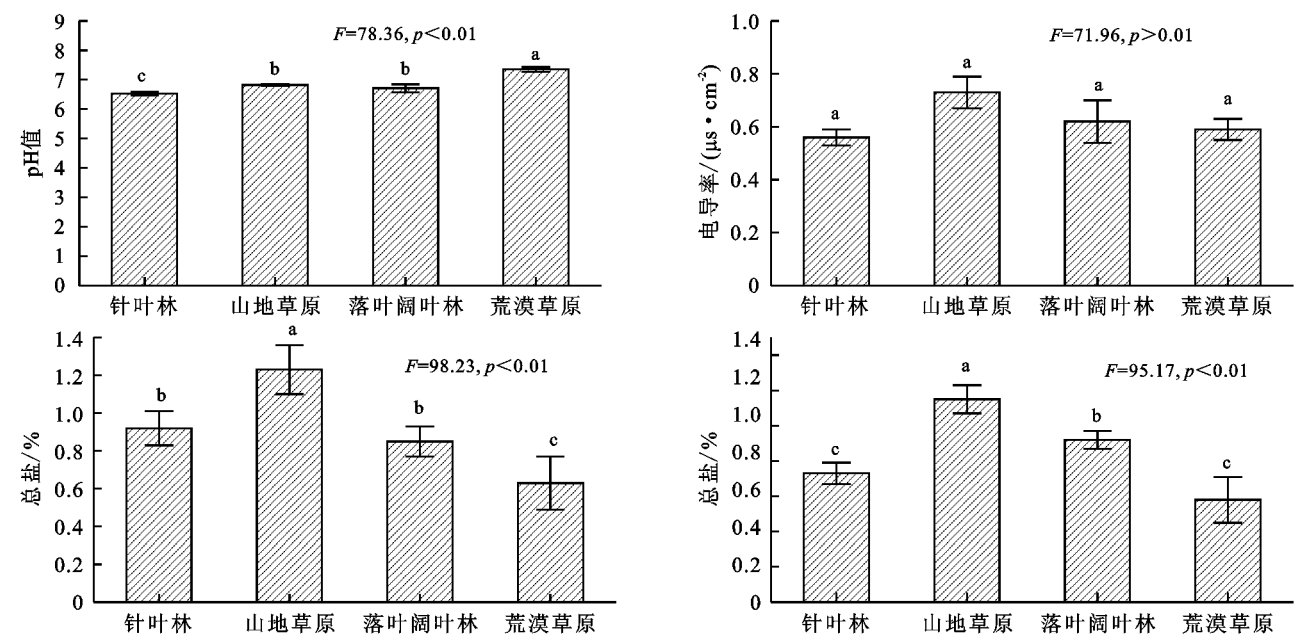


图3 伊犁河谷山地北坡土壤盐分格局

表2 伊犁河谷山地北坡土壤因子的主成分分析

主成分	主成分得分								累积贡献率/%
	有机质	有效氮	有效磷	有效钾	pH 值	电导率	总盐	全盐	
1	0.456	0.758	−0.256	0.694	0.301	0.235	0.956	0.912	78.36
2	0.711	0.869	0.411	0.156	−0.845	0.755	−0.234	−0.125	93.91
3	0.315	0.524	−0.865	−0.752	0.623	0.515	0.831	0.754	96.25
4	0.168	0.396	0.125	0.374	0.689	0.703	0.714	0.523	99.58

2.6 伊犁河谷山地北坡植被与土壤因子相关性排序

对伊犁河谷山地北坡多样性指数进行 DCA 排序分析, Monte-Carlo test 显示所有的排序轴都是极显著($p<0.01$)。由表 3 可知, 2 个排序轴的特征值分别为 0.426, 0.123, 多样性累积解释量及多样性—环境关系累积解释量分别达 71.3% 和 82.4%, 说明排序效果良好。根据前两个排序轴作出二维排序图, 各多样性指数在排序图中是一个点, 其位置反映该指数在环境因子梯度上取得最高值的位置。指向诸环境因子箭头的方向代表其与排序轴的正负相关性, 长度反映环境因子与多样性指数分布格局之间关系的强弱。线越长, 说明相关性越大, 反之则越小。箭头连线与排序轴的夹角表示某个环境因子与排序轴之间相关性的大小, 夹角越小, 相关性越大。沿着 DCA 第一轴从左向右, 随着海拔逐渐降低, 土壤有机质、有效氮和有效钾等土壤养分的含量逐渐下降, 而 pH 值和电导率逐渐上升; 沿着 DCA 第二轴, 随着海拔逐渐降低, 土壤总盐和全盐含量逐渐增加, 而土壤有效磷含量却逐渐降低。这表明 8 个环境因子中, 影响河谷北坡植物群落物种多样性分布格局的主要因子是土壤有机质、有效氮、有效钾和盐分含量, 这与主成分的分析结果基本一致(表 4, 图 4)。

表3 DCA 排序结果

排序轴	轴 1	轴 2
特征值	0.426	0.123
多样性与环境相关性	0.985	0.652
多样性累积解释量/%	45.9	52.8
多样性与环境关系累积解释量/%	71.3	82.4
p 值	<0.000**	<0.000**
F 值	9.23	6.15

表4 土壤因子与 DCA 排序轴相关系数

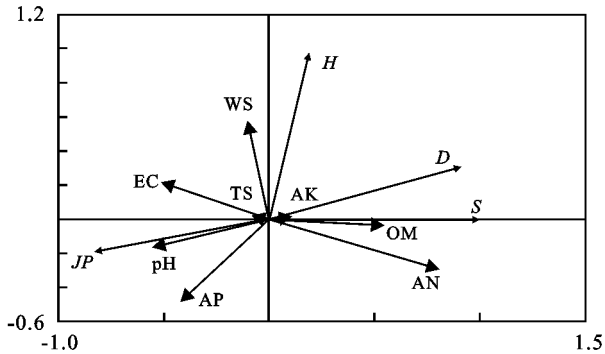
土壤参数	轴 1	轴 2
有机质	0.523*	0.631*
有效氮	0.236	0.385
有效磷	0.058	−0.245
有效钾	0.658*	0.257
pH 值	−0.752**	−0.358
电导率	0.413	0.514*
总盐	0.903**	0.847**
全盐	0.865**	0.912**

注: ** 表示 $p<0.01$, * 表示 $p<0.05$ 。

3 讨论

山地由于其复杂多样的生态环境条件, 成为多种生物物种生存、繁衍和保存下来的种质库, 山地生物多样性的研究历来为生态学家所关注^[20-21]。海拔梯度上

的植物物种多样性格局一直是植物生态学家的重要内容,而不同的山地有不同垂直分布格局^[20-21]。已有研究表明,物种多样性沿海拔梯度的分布格局一般有 5 种形式,分别是随海拔升高先降低后升高、先升高后降低(单峰曲线)、单调升高、单调下降和没有明显格局^[22]。而本文得出的物种丰富度格局并没有完全符合以上格局,表现出先逐渐升高后下降再升高的比较特殊的格局,草本植物在高海拔下多样性指数下降到最低,海拔 2 100 m 以上群落仅有乔木雪岭云杉,虽然进入了郁闭的雪岭云杉林,林下生境阴暗冷湿,抑制了多数灌木种类的生存,却使得草本种类很多,各多样性指数在这个海拔范围内又升高。其中,Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 指数的变化趋势相似,野果林只出现于河谷北坡的前山带,主要是因为不断起伏的地形阻挡了寒潮和干旱风,为野果林提供了生存条件灌木种类多生长在坡度较大、向阳的环境中。



注:JP 表示 Pielou 均匀度指数;H 表示 Shannon-Wiener 多样性指数;D 表示 Simpson 优势度指数;S 表示 Patrick 丰富度指数;pH 表示 pH 值;EC 表示电导率;TS 表示总盐;WS 表示全盐;OM 表示有机质;AN 表示有效氮;AK 表示有效钾;AP 表示有效磷。

图 4 伊犁河谷山地北坡植被多样性与土壤养分 DCA 排序

多样性分布格局主要受坡度、海拔、有效磷含量和土壤含水量等环境因子的影响;实际上,草本植物群落是伊犁河谷植物群落的主体,面积占伊犁河谷土地面积的 60.88%,这种植被特征的形成是一个长期的历史过程,说明伊犁河谷是比较适合草本植物生长的。有研究表明,土壤养分有效性增高会降低草本植物群落的物种多样性,这是由于生产力增长以及物种对光照条件的竞争加剧,导致一些生长迅速的草本取代生长缓慢的草本和灌木,因此海拔较高的地方出现部分灌木^[20-21]。此外,在海拔较低的地区水分条件受到限制,在海拔较高的地区土壤水分充足但热量有限,所以总体和草本层的多样性指数在中等海拔等一系列的中度环境条件下较大。在低海拔地区多样性指数明显较低,这主要是由干旱和贫瘠的土壤环境造成的^[9,11-12],形成这种差异的原因可能在于前者是基于物种数目的丰富度指数,而后者是反映丰富度和均

匀度的综合指标,处于海拔最低处的荒漠草原植物群落类型,种类十分有限,多样性指数在此处较低,而 Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 指数草本层的种类极其丰富。早在 1973 年,张新时^[13]就指出在天山深处浓密的野苹果林以淡绿色球形树冠构成大片林层与高处山坡上的雪岭云杉暗蓝绿色的针叶林带形成鲜明的对照。这样的山地植被垂直带谱结构特点——基带缺乏旱生植被带和具有中生性强的落叶阔叶林带,对于荒漠地带山地垂直带谱结构实在是个极大的例外。而这种例外也表现出特殊的植被垂直分布格局,桑卫国等^[23]在研究天山中段植被的时候也表现出了比较类似的垂直格局,他指出这是一种单峰分布格局,而本文认为这是在干旱区的一个比较特殊的垂直分布格局,而这种垂直分布方式与当地的特殊气候和环境因子密切相关。

物种多样性的分布格局主要与气候、群落生产力和环境因子相关,同时还在不同程度上受到植被演化历史的影响^[20-21,24]。研究区位于我国的干旱和半干旱区,而伊犁河谷地处中纬度内陆,地形为北、东、南三面高山环绕,唯西面开敞的“U”形谷地。大西洋、里海、巴尔喀什湖的温湿气流能顺利进入本区,形成了较为湿润的大陆性北温带气候。在这封闭、半封闭的山间谷底内,有特殊的“冷湖作用”。冬季高山冷空气下沉,聚积于谷底,从而形成谷底气温最低,沿坡随高程增加,至 800~2 000 m,形成了特殊的“逆温层”地带,在这种独特的地理位置下,研究区物种丰富度在针叶林和落叶阔叶林最高,在荒漠草原带和山地草原带较低,这符合前人的研究在中海拔梯度较高的中间膨胀假说^[25];并且土壤养分基本随着海拔的增加而增加,在针叶林和落叶阔叶林的土壤肥力高,有利于植物的生长;在此过程中,土壤盐分随着海拔的增加也基本表现出一致的变化规律,但土壤养分和盐分的变化与植被带不尽一致,可能具有一定的滞后期,这种分布格局可能是温度在这起着非常大的作用,土壤因子起的作用次之。

主成分分析可知,在第 1 主成分上,土壤全盐、总盐、电导率有较大的正值。因此,第 1 主成分实质上是对土壤环境和土壤盐分储量、保存的量度,可称为盐分因子。在第 2 主成分上,土壤有效氮和有机质有较大的正值,土壤 pH 值有较大的负值。土壤有效氮是指可以被水溶解的土壤养分,是易淋失和被植物直接吸收和利用的部分,其有效含量对植物生长具有决定性作用。土壤有机质的含量与土壤肥力水平有密切关系,在土壤肥力中起着多方面的作用。通常在其他条件相似的情况下,在一定含量范围内,有机质含量的

多少,将反映土壤肥力水平的高低。土壤 pH 值跟土壤盐分有密切关系,在这一主成分中跟养分呈较大的负相关关系。因此,第 2 主成分实质上是对土壤环境和土壤养分储量、保存的量度,可称为保肥、供肥因子;由此可知,山地植物群落物种多样性的垂直分布格局是由海拔为主的多种环境因子综合作用的结果。

4 结论

以伊犁河谷山地北坡植物群落样方调查和土壤测定数据为基础,分析整个群落的物种多样性、土壤养分和盐分在海拔梯度上的分布格局,探讨影响群落中各生活型及总体物种多样性分布格局的关键性环境因子,不仅可以为植被与植物资源的保护与利用提供重要的科学依据,亦将深化河谷区山地植被与环境关系研究的基础科学理论。研究结论如下:

(1) 根据其植被带和土壤带沿不同海拔将其分为针叶林、山地草原、落叶阔叶林和荒漠草原;其总的物种丰富度和 Simpson 指数与海拔呈现先升高后降低,再升高的格局,不同海拔植被群落丰富度指数之间差异均显著($p < 0.05$),Shannon-Wiener 指数随海拔的增加呈先增加后降低的趋势,Pielou 均匀度指数随海拔的增加呈先降低后增加,然后降低的格局。

(2) 犁河谷山地北坡土壤有机质和有效氮含量随海拔的增加而增加的格局,基本表现为针叶林>山地草原>落叶阔叶林>荒漠草原,其中不同海拔植被群落土壤有机质含量之间差异均显著($p < 0.05$),土壤有效磷含量没有明显的垂直变化规律,土壤有效钾含量随海拔的增加呈先增加后降低的格局,基本表现为山地草原>针叶林>落叶阔叶林>荒漠草原。

(3) 犁河谷山地北坡土壤 pH 值随海拔的增加而降低的格局,基本表现为荒漠草原>山地草原>落叶阔叶林>针叶林,土壤电导率、全盐和总盐含量均随海拔的增加呈先增加后降低的格局,基本表现为山地草原>落叶阔叶林>荒漠草原>针叶林。

(4) 主成分的结果分析表明,第一主成分负荷值最高的分别为土壤全盐、总盐、电导率,可称为土壤盐分因子;第二主成分负荷值最高的分别为土壤有效氮、有机质和 pH 值,可称为保肥、供肥因子。

(5) DCA 排序结果表明,沿着 DCA 第一轴,随着海拔逐渐降低,土壤有机质、有效氮和有效钾等土壤养分的含量逐渐下降,而 pH 值和电导率逐渐上升;沿着 DCA 第二轴,随着海拔逐渐降低,土壤总盐和全盐含量逐渐增加,而土壤有效磷含量却逐渐降低。由此可知,犁河谷山地北坡植物群落多样性的垂直分布格局是由海拔为主的多种环境因子综合作用的结果,而土

壤养分和盐分随海拔的变化与植被带不尽一致,可能它们之间的同步变化存在一定的滞后期。

参考文献:

- [1] Williams A, Hedlund K. Indicators of soil ecosystem services in conventional and organic arable fields along a gradient of landscape heterogeneity in southern Sweden[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 65: 1-7.
- [2] Gaylor M O, Mears G L, Harvey E, et al. Polybrominated diphenyl ether accumulation in an agricultural soil ecosystem receiving wastewater sludge amendments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48 (12): 7034-7043.
- [3] Pauli H, Gottfried M, Dullinger S, et al. Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits[J]. *Science*, 2012, 336(6079): 353-355.
- [4] Bagchi R, Gallery R E, Gripenberg S, et al. Pathogens and insect herbivores drive rainforest plant diversity and composition[J]. *Nature*, 2014, 506(7486): 85-88.
- [5] Li L, Tilman D, Lambers H, et al. Plant diversity and overyielding: insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture[J]. *New Phytologist*, 2014, 203(1): 63-69.
- [6] Steinauer K, Tilman D, Wragg P D, et al. Plant diversity effects on soil microbial functions and enzymes are stronger than warming in a grassland experiment[J]. *Ecology*, 2015, 96(1): 99-112.
- [7] Dinnage R, Cadotte M W, Haddad N M, et al. Diversity of plant evolutionary lineages promotes arthropod diversity[J]. *Ecology Letters*, 2012, 15(11): 1308-1317.
- [8] Whitfeld T J S, Roth A M, Lodge A G, et al. Resident plant diversity and introduced earthworms have contrasting effects on the success of invasive plants[J]. *Biological Invasions*, 2014, 16(10): 2181-2193.
- [9] 田中平, 庄丽, 李建贵. 伊犁河谷北坡垂直分布格局及其与环境的关系: 一种特殊的双峰分布格局[J]. *生态学报*, 2012, 32(4): 1151-1162.
- [10] 罗黎明, 苗彦军, 武建双, 等. 拉萨河谷山地灌丛草地物种多样性随海拔升高的变化特征[J]. *草业学报*, 2014, 23(6): 320-326.
- [11] 孙慧兰, 李卫红, 杨余辉, 等. 伊犁山地不同海拔土壤有机碳的分布[J]. *地理科学*, 2012, 32(5): 603-608.
- [12] 张旭琛, 朱华忠, 钟华平, 等. 新疆伊犁地区草地植被地上生物量遥感反演[J]. *草业学报*, 2015, 24(6): 25-34.
- [13] 张新时. 伊犁野果林的生态地理特征和群落学问题[J]. *植物学报*, 1973(2): 9-12.
- [14] 徐远杰, 陈亚宁, 李卫红, 等. 伊犁河谷山地植物群落物种多样性分布格局及环境解释[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(10): 1142-1154.

内(2012~2013年)移动量为 $897.56 \sim 1\,305.29 \text{ m}^3$, 输沙量为 $29.011 \sim 22.443 \text{ t}/(\text{m} \cdot \text{a})$ 。可见沙丘不断向黄河侵袭, 如果沙丘移动得不到有效的遏制, 势必对黄河沿岸植被造成威胁, 增加黄河泥沙含量, 更有可能使黄河改道, 对下游生态环境的影响甚大。

参考文献:

- [1] 朱震达, 陈治平, 吴正. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1981: 27-80.
- [2] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 91-361.
- [3] Lancaster N. Geomorphology of Desert Dunes [M]. New York: Routledge, 1995.
- [4] 屈建军, 凌裕泉, 井哲帆, 等. 包兰铁路沙坡头段风沙运动规律及其与防护体系的相互作用 [J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 529-533.
- [5] 张春来, 郝青振, 邹学勇, 等. 新月形沙丘迎风坡形态及沉积物对表面气流的响应 [J]. 中国沙漠, 1999, 29(4): 63-67.
- [6] Dong Z, Qian G, Luo W, et al. A wind tunnel simulation of the effects of stoss slope on the lee airflow pattern over a two-dimensional transverse dune [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2007, 112(F3): 130-144.
- [7] 刘陶, 杨小平, 董巨峰, 等. 巴丹吉林沙漠沙丘形态与风动力关系的初步研究 [J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1285-1291.
- [8] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 回涡沙丘的形态特征与表面物质组成 [J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 587-592.
- [9] 王永胜. 库姆塔格沙漠东缘风沙活动及羽毛状沙丘剖面特征 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [10] 范冬冬, 李生字, 雷加强, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地高大复杂纵向沙垄区简单横向沙丘形态特征的空间变异 [J]. 干旱区研究, 2009, 26(5): 755-762.
- [11] 李锋. 沙尘暴灾害风险评估指标体系初探 [J]. 灾害学, 2011, 26(4): 8-13.
- [12] 董智. 乌兰布和沙漠绿洲农田沙害及其控制机理研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2004.
- [13] 董智, 李红丽. 乌兰布和沙漠人工绿洲沙害综合控制技术体系 [J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 339-345.
- [14] 李红丽, 董智, 左合君, 等. 乌兰布和沙漠农田沙害特征及其时空变化规律 [J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 346-351.
- [15] 刘芳, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘地表风沙流结构特征 [J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1200-1207.
- [16] 何京丽, 郭建英, 邢恩德, 等. 黄河乌兰布和沙漠段沿岸风沙流结构与沙丘移动规律 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 71-77.
- [17] 桂洪杰. 黄河宁夏河段四大沙漠粒度和元素特征对比研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [18] 陈新闻, 郭建英, 董智, 等. 乌兰布和沙漠乌海段新月形沙丘表层沉积物粒度与重金属分布特征 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 47-51.
- [19] 杨志勇, 陈新闻, 郭建英, 等. 乌兰布和沙漠不同土地利用类型粒度特征分析 [J]. 中国水土保持, 2015(7): 50-53.
- [20] 陈新闻, 郭建英, 董智, 等. 乌兰布和沙漠沿黄段不同土地利用类型对土壤分形特征的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(11): 169-173.
- [21] 严应存, 高贵生, 刘宝康, 等. 青海湖周边地区沙丘移动监测及其气候驱动力分析 [J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 617-622.
- [22] 朱震达, 陆锦华, 江伟铮. 塔克拉玛干沙漠克里雅河下游地区风沙地貌的形成发育与环境变化趋势的初步研究 [J]. 中国沙漠, 1988, 8(2): 4-13.

(上接第39页)

- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 胡克林, 陈德立. 农田土壤养分的空间变异性特征 [J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 33-38.
- [17] 刘建新. 不同农田土壤酶活性与土壤养分相关关系研究 [J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 523-525.
- [18] 蒋文伟, 周国模, 余树全, 等. 安吉山地主要森林类型土壤养分状况的研究 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 73-76.
- [19] 赵彦锋, 郭恒亮, 孙志英, 等. 基于土壤学知识的主成分分析判断土壤重金属来源 [J]. 地理科学, 2008, 28(1): 45-50.
- [20] 方精云, 沈泽昊, 唐志尧, 等. “中国山地植物物种多样性调查计划”及若干技术规范 [J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 5-9.
- [21] 方精云. 探索中国山地植物多样性的分布规律 [J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 1-4.
- [22] 赵淑清, 方精云, 宗占江, 等. 长白山北坡植物群落组成、结构及物种多样性的垂直分布 [J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 164-173.
- [23] 桑卫国, 王霞霞, 苏宏新, 等. 天山云杉树轮宽度对梯度水分因子的响应 [J]. 科学通报, 2007, 52(19): 2292-2298.
- [24] 贺金生, 陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征 [J]. 生态学报, 1997, 17(1): 91-99.
- [25] 冯建孟, 王襄平, 李晶, 等. 面积和中间膨胀效应对丽江地区种子植物物种丰富度垂直分布格局的影响 [J]. 生物多样性, 2006, 14(2): 107-113.