

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第7期 Vol.31 No.7 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 7 期

2011 年 4 月 (半月刊)

目 次

川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤氮库与微生物的季节变化·····	龚 伟,胡庭兴,王景燕,等 (1763)
IBIS 模拟东北东部森林 <i>NPP</i> 主要影响因子的敏感性·····	刘 曦,国庆喜,刘经纬 (1772)
不同坡位沙棘光合日变化及其主要环境因子·····	靳甜甜,傅伯杰,刘国华,等 (1783)
氮、硫互作对克隆植物互花米草繁殖和生物量累积与分配的影响·····	甘 琳,赵 晖,清 华,等 (1794)
海岛棉和陆地棉叶片光合能力的差异及限制因素·····	张亚黎,姚贺盛,罗 毅,等 (1803)
遮荫对连翘光合特性和叶绿素荧光参数的影响·····	王建华,任士福,史宝胜,等 (1811)
3 种木本植物在铅锌和铜矿砂中的生长及对重金属的吸收·····	施 翔,陈益泰,王树凤,等 (1818)
施氮水平对小麦籽粒谷蛋白大聚合体粒径分布的调控效应·····	王广昌,王振林,崔志青,等 (1827)
强光下高温与干旱胁迫对花生光系统的伤害机制·····	秦立琴,张悦丽,郭 峰,等 (1835)
环境因子和干扰强度对高寒草甸植物多样性空间分异的影响·····	温 璐,董世魁,朱 磊,等 (1844)
利用 CASA 模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力·····	董 丹,倪 健 (1855)
北京市绿化树种紫玉兰的蒸腾特征及其影响因素·····	王 华,欧阳志云,任玉芬,等 (1867)
平衡施肥对缺磷红壤性水稻土的生态效应·····	陈建国,张杨珠,曾希柏,等 (1877)
冬小麦种植模式对水分利用效率的影响·····	齐 林,陈雨海,周勋波,等 (1888)
黄土高原冬小麦地 N_2O 排放·····	庞军柱,王效科,牟玉静,等 (1896)
花前渍水预处理对花后渍水逆境下扬麦 9 号籽粒产量和品质的影响·····	李诚永,蔡 剑,姜 东,等 (1904)
低硫氮比酸雨对亚热带典型树种气体交换和质膜的影响·····	冯丽丽,姚芳芳,王希华,等 (1911)
夹竹桃皂甙对福寿螺的毒杀效果及其对水稻幼苗的影响·····	戴灵鹏,罗蔚华,王万贤 (1918)
海河流域景观空间梯度格局及其与环境因子的关系·····	赵志轩,张 彪,金 鑫,等 (1925)
中国灌木林-经济林-竹林的生态系统服务功能评估·····	王 兵,魏江生,胡 文 (1936)
城郊过渡带湖泊湿地生态服务功能价值评估——以武汉市严东湖为例·····	王凤珍,周志翔,郑忠明 (1946)
黄河三角洲植物生态位和生态幅对物种分布-多度关系的解释·····	袁 秀,马克明,王 德 (1955)
基于景观可达性的广州市林地边界动态分析·····	朱耀军,王 成,贾宝全,等 (1962)
红脂大小蠹传入中国危害特性的变化·····	潘 杰,王 涛,温俊宝,等 (1970)
基于线粒体 <i>Cyt b</i> 基因的西藏马鹿种群遗传多样性研究·····	刘艳华,张明海 (1976)
不同干扰下荒漠啮齿动物群落多样性的多尺度分析·····	袁 帅,武晓东,付和平,等 (1982)
秦岭鼯鼠的洞穴选择与危害防控·····	鲁庆彬,张 阳,周材权 (1993)
京杭运河堤坝区域狗獾的栖息地特征·····	殷宝法,刘宇庆,刘国兴,等 (2002)
专论与综述	
微生物胞外呼吸电子传递机制研究进展·····	马 晨,周顺桂,庄 莉,等 (2008)
厌氧氨氧化菌脱氮机理及其在污水处理中的应用·····	王 惠,刘研萍,陶 莹,等 (2019)
问题讨论	
海河流域森林生态系统服务功能评估·····	白 杨,欧阳志云,郑 华,等 (2029)
研究简报	
体重和盐度对中国蛤蚧耗氧率和排氨率的影响·····	赵 文,王雅倩,魏 杰,等 (2040)
虾塘养殖中后期微型浮游动物的摄食压力·····	张立通,孙 耀,赵从明,等 (2046)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 290 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-04



封面图说:日斜茅荆坝·河北茅荆坝——地处蒙古高原向华北平原过渡地带的暖温带落叶阔叶林,色彩斑斓,正沐浴着晚秋温暖的阳光。

彩图提供:国家林业局陈建伟教授 E-mail: cites.chenjw@163.com

环境因子和干扰强度对高寒草甸植物多样性空间分异的影响

温璐¹, 董世魁^{1,*}, 朱磊¹, 施建军², 刘德梅³, 王彦龙², 马玉寿²

(1. 北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 100875 北京; 2. 青海大学青海省畜牧兽医科学研究院草原研究所, 810003 西宁;
3. 中国科学院西北高原生物研究所, 810008 西宁)

摘要: 采用样带与样地结合的方法在三江源自然保护区的核心区沿海拔梯度在阴坡、阳坡分别进行草本植被调查, 通过因子分析和偏相关分析研究丰富度指数、多样性指数与环境梯度(包括海拔梯度、裸斑面积、坡度、土壤总碳、总氮含量、土壤 pH 值、土壤总可溶性盐含量)和干扰强度(鼠类干扰强度、放牧强度)之间的关系。研究结果表明: 杂类草丰富度指数(D_{Ma} 杂)与总物种丰富度指数(D_{Ma} 总)极显著相关($P < 0.01$); 阳坡 D_{Ma} 杂和 D_{Ma} 总均呈现“中海拔膨胀”现象, 阴坡 D_{Ma} 杂和 D_{Ma} 总与海拔梯度呈正相关, 莎草科和禾本科的丰富度指数(D_{Ma} 莎和 D_{Ma} 禾)随海拔升高并无明显规律; 通过主成分分析, 及偏相关分析, 第一主成分(裸斑面积、鼠类干扰和放牧强度)与除莎草科 Margalef 丰富度指数、禾本科 Simpson 指数和禾本科 Pielou 均匀度指数外的其它草地多样性指数均显著相关, 是影响阳坡草地植物多样性的主要因子, 土壤总碳、总氮含量对阳坡禾本科类群的多样性指数和均匀度指数有极显著影响, 土壤 pH 值、TDS 含量和坡度对阳坡莎草科类群的丰富度有显著影响; 海拔梯度、土壤总碳、总氮以及 pH 值对阴坡草本植物群落的多样性影响较大。研究结论认为, 植物群落生物多样性的空间分异特征是地理环境、土壤环境以及干扰强度等因素综合作用的结果。无干扰或干扰较弱时, 物种多样性主要受土壤环境状况所影响; 而在强干扰存在条件下, 干扰强度对物种丰富度和多样性的影响比环境因子更显著; 遏制高寒草甸植物多样性降低应首先控制放牧及鼠类等强干扰活动。

关键词: 自然因素; 干扰; 植物多样性; 高寒草甸

The effect of natural factors and disturbance intensity on spacial heterogeneity of plant diversity in alpine meadow

WEN Lu¹, DONG Shikui^{1,*}, ZHU Lei¹, SHI Jianjun², LIU Demei³, WANG Yanlong², MA Yushou²

1 State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine of Qinghai University, Xining 810003, China

3 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

Abstract: Structure and biodiversity of herbages were examined using the both transects and quadrats along topographical gradients on both shade and sunny slopes at the core zone of Three Rivers Sources Nature Protection Area. The relationships among richness index, diversity index and environmental factors (altitude, bare patch, slope, soil total carbon, soil total nitrogen, soil pH, soil total dissolved salt), disturbance intensity (rodent destroying and livestock grazing) were analyzed by factor analysis and partial correlation analysis. The results showed that the Margalef richness index of forbs had significant ($P < 0.01$) correlation with the Margalef richness index of all species; the Margalef richness index for this two functional groups presented a peak with higher species diversity index in the communities of middle elevation on the sunny side; there was a positive correlation between the Margalef richness index of forbs and all species and altitude gradient on the shade slope. With the increase of altitude, there was not distinct change on Margalef richness index of grasses and sedges. According to the results of Factor Analysis (FA) and Partial Correlation, the First principal component, including

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30870466, 50939001)

收稿日期: 2010-03-06; 修订日期: 2010-05-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dongshikui@sina.com

soil patch, rodent disturbance and grazing intensity, significantly affected most of the biodiversity index of total species, except Margalef richness index of Cyperaceae, Simpson index of Gramineae and Pielou evenness index of Gramineae. So, the main factors influenced the diversity of all herbages on the sunny slope were soil patch, rodent disturbance and grazing intensity. Soil total carbon and nitrogen had significant effect on the diversity index and evenness index of grassed on the sunny slope. soil pH, total dissolved salt gathered with slope greatly influenced the richness index of sedges on the sunny slope. Altitude, soil total carbon and nitrogen, soil pH all had major effect on species diversity on the shade slope. The conclusions are that the spatial heterogeneity of species diversity resulted from the interaction of geographical environment (altitude, bare patch, slope), soil condition (soil total carbon, soil total nitrogen, soil pH, soil total dissolved salt) and disturbance intensity (rodent destroying and livestock grazing). At the small scale along the altitude gradient, the effect of the environment factor does not have significant effect on species diversity. Soil circumstance was the main Influencing factor for altering species diversity under no-disturbance or slight disturbance. Under heavy disturbance, intensity of disturbance had more significant influence on species richness and diversity than environmental factors. Reducing the heavy disturb such as grazing and rodent destroy was the first choice for preventing the degradation of alpine grassland and loss of herbage diversity in the alpine region.

Key Words: natural factors; disturbance; plant diversity; alpine meadow

“世界屋脊”青藏高原是亚洲主要河流长江、黄河和澜沧江的发源地,也是中国乃至亚洲最为最重要的水源涵养区和生态功能区,发挥着“中华水塔”、“绿色生态屏障”、“草地畜牧业基地”等重要功能^[1-2]。草地是青藏高原地区面积最大、分布最广的生态系统类型,它不仅是该区最重要的生命支持系统^[3],而且也是全球高山植被多样性的主要基因库^[4]。然而自 20 世纪 70 年代以来,受气候变暖、人类活动等因素的影响,该区草地生态系统严重退化,部分地区出现“黑土滩”、“鼠荒地”等次生裸地,严重影响了草地生态系统的生物多样性和生态系统功能。据报道,近年来由于气候变化与逆向干扰强度的增加,青藏高原腹地三江源区高寒草甸 15%—23% 的土著植物濒临灭绝^[5],濒危植物物种数量不断增加^[3]。

生物多样性是维持生态系统结构和功能稳定的基础^[6-7],也是生态系统结构和功能的测度指标^[8-10]。生态系统的群落物种组成和多样性发生变化,不仅会导致生态系统结构和功能的改变^[11-13],还会对毗邻地区的生态系统产生深刻影响^[3],甚至会改变整个区域的生态过程^[14]。因此,开展生物多样性变化驱动因子分析研究、提出基于驱动因子调控的生物多样性维持机制,对生态系统结构和功能的保育具有极其重要的科学意义。对于青藏高原高寒草地植物多样性的格局变化,近年来部分学者开展了海拔高度^[15]、土壤养分^[16]、放牧强度^[17]、鼠类活动^[18-19]等环境因子或干扰活动的单要素作用效应研究,但目前尚无定论。相关研究表明,青藏高原地区高寒草地的植物多样性随海拔梯度的增加呈现单峰、正线性、负线性等规律^[15],随施肥水平的提高植物多样性减少^[16],随放牧强度增强呈现下降或单峰变化模式^[17],随鼠类活性强度增加呈负相关或单峰模式^[18-19]。迄今在青藏高原高寒草地(尤其是退化草地)植物多样性分布格局的研究中,仍缺乏对环境因素和干扰活动综合作用效应的系统分析。

国外学者对地中海半干旱区典型草原的研究结果表明,人类干扰活动、草地斑块大小和环境因子的综合作用是造成不同退化等级草地生物多样性格局空间分异的主要原因^[20]。藉此,本文在青藏高原腹地三江源区不同环境梯度、不同干扰强度、不同退化程度的高寒草地上开展试验研究,调查分析草地植物群落总体及各功能群内(莎草科、禾本科及杂类草)物种丰富度及多样性指数,厘清草地生物多样性指数与环境梯度、干扰强度及草地退化程度的相关关系,回答如下 3 个科学问题:高寒草地生物多样性变化的主要驱动因子是什么?不同驱动因子对生物多样性变化的影响是否有互作效应?如何调控驱动因子对生物多样性变化的作用效应?通过这些科学问题的准确解答,以期为三江源区乃至整个青藏高原高寒草地生物多样性的持续维持提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省果洛藏族自治州玛沁县大武镇,地处青藏高原中部、三江源国家级自然保护区的核心区。研究区地形为高山山地,平均海拔 3900m,属于高寒大陆性气候,年均温为 -0.6°C ,年最低温为 -34.9°C , $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温分别为 1202.6 $^{\circ}\text{C}$ 和 865.0 $^{\circ}\text{C}$;年降水量约为 513mm,主要集中在 5 月到 9 月;年蒸发量为 1459mm,年日照时间为 2571h,无绝对无霜期。研究区土壤属于粘土,根据国家土壤分类系统属于高山草甸土。该区阳坡原生植被主要为以嵩草、蓼属和早熟禾为优势种的高寒草甸,而阴坡原生植被主要为以高山柳和金露梅为优势种的高山灌丛草甸。受过度放牧和鼠类破坏的影响,该区阳坡植被在海拔 3700m(河漫滩及山前阶地)—4000m(山脊)的空间范围内呈现极度退化(次生裸地)至轻度退化(杂类草草地)演进的状态。

1.2 试验设计

参照马玉寿等^[21]提出的高寒退化草地等级划分标准,将阳坡植被按海拔梯度划分为 4 个退化梯度:3770—3810m 为极度退化,3811—3850m 为重度退化,3851—3890m 为中度退化,3891—3930m 为轻度退化。由于受放牧干扰影响较小,阴坡灌丛草甸植被基本处于未退化状态,但为了便于和阳坡草本植被进行对比分析,也设置了相同的海拔梯度。对于不同退化程度的草地植被,主要考虑了地理环境(包括海拔、坡度、裸斑面积)和土壤条件(包括土壤总碳、总氮含量、土壤 pH 值、土壤总可溶性盐)、干扰强度(放牧强度和鼠类活动强度)对其群落物种组成和植物多样性的影响。其中,放牧干扰强度通过牧户调查来确定,离居住点较近的低海拔地区放牧强度较大,为过度放牧(12 只羊单位/ hm^2);而离居民点最远的高海拔地区(3891—3930m)放牧强度较轻(2 只羊单位/ hm^2),中海拔地区分别为:3851—3890m 处中度放牧(4 只羊单位/ hm^2),3811—3850m 处重度放牧(8 只羊单位/ hm^2);鼠类活动强度则用草地有效鼠洞的数目来体现:3770—3810m 处 1014.3 洞/ hm^2 ,3811—3850m 处 595.7 洞/ hm^2 ,3851—3890m 处 165.7 洞/ hm^2 和 3891—3930m 处 8.6 洞/ hm^2 。

1.3 植被调查与分析

采用样带与样地相结合的方法,于 2008 年 7—8 月在阴坡与阳坡各设置 1 条样带,样带海拔梯度为 200m,每隔 40m 垂直海拔梯度设置 1 个样地,即海拔 3770—3810m 之间为 1 号样地,海拔 3811—3850m 之间为 2 号样地,海拔 3851—3890m 之间为 3 号样地,海拔 3891—3930m 之间为 4 号样地。阳坡 4 个样地内分别随机选取 4 个 1m $\times$ 1m 样方,阴坡样地随机选取 3 个 0.5m $\times$ 0.5m 样方(由于受干扰较小,植被分布较均匀,可以用较小的采样面积来反映),进行植物群落特征(包括所有植物种的分盖度、高度及植物群落的盖度)调查,然后齐地面分种剪草测定其地上生物量,具体测定参照“陆地生物群落测定方法”^[22]进行。阳坡 4 个样地分别随即选取 30 个 0.5m $\times$ 0.5m 的样方,阴坡 4 个样地分别随机选取 12 个 0.5m $\times$ 0.5m 的样方(由于阴坡植物分布较均匀,可以采用较少的样方反映其植物组成),调查植物群落的多度,用以植物多样性指数的计算。将所有植物按莎草科、禾本科和杂类草 3 大功能群归类,其中莎草科主要包括矮嵩草、线叶嵩草、二柱头薹草等莎草科植物,禾本科主要包括草地早熟禾、冷地早熟禾和垂穗披碱草等禾本科植物,其余植物种类均归为杂类草。

1.4 环境因子调查

在进行植被调查的同时,记录每个样方所处的经纬度、海拔高度、坡度、坡向、裸斑面积等地理环境因子。在上述植被调查的各个样方内分别采用对角线布点法,用直径为 3.5cm 土钻钻取 3 钻 0—10cm 土层土样,将其充分混合、风干、研磨,分别过孔径为 0.85mm 和 0.15mm 土壤筛,筛除土壤中的根系,以备室内实验分析。土壤 pH 值和总可溶性盐(TDS)利用玻璃电极测定(2.5:1 的水土比悬液),土壤总碳和总氮采用自动元素分析仪测定。

1.5 数据处理

根据植物群落数量特征的样方调查结果,分别计算各个物种的重要值(IV)。对于阳坡草本物种,其重要

值记为 IV_h , 对于阴坡草本的重要值记为 IV'_h , 计算公式如下:

$$IV_h = (\text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对干重} + \text{相对频度} + \text{相对密度}) / 5$$

$$IV'_h = (\text{相对盖度} + \text{相对频度} + \text{相对密度}) / 3$$

根据植物群落物种组成的样地调查结果, 计算不同海拔梯度(退化程度)、干扰强度下, 草地植被的多样性指数, 包括 Margalef 丰富度指数(D_{Ma})、Simpson 指数(D)和 Pielou 均匀度指数(J), 具体计算公式如下:

Margalef 丰富度指数

$$D_{Ma} = (S - 1) / \ln N$$

Simpson 指数

$$D = 1 - \sum p_i^2$$

Pielou 均匀度指数

$$J = (-\sum p_i \lg p_i) / \ln S$$

式中, S 代表物种数目, $p_i = n_i / N$, 表明第 i 个物种的相对多度, n_i 为第 i 个种的个体数目, N 为群落中所有种的个体总数。

1.6 数据统计分析

将所有样方调查即实验室分析数据求算平均值, 采用 origin 6.1 制图。采用 spss13.0 统计软件包进行相关分析、因子分析以及偏相关分析, 厘清生物多样性在海拔梯度/草地退化梯度上的分异特征, 建立环境因子、干扰强度及其互作效应与生物多样性指数间关系的数学模型, 量化不同驱动因子对生物多样性空间分异的贡献大小。

2 结果与分析

2.1 不同海拔梯度/草地退化梯度上植物分布变化规律

通过对阴坡与阳坡的 8 个样地草本植物调查, 共发现 132 种维管植物, 分属 31 个科和 88 个属, 其中样方中出现次数最多的有菊科 (Compositae, $n = 20$ 种), 莎草科 (Cyperaceae, $n = 9$ 种), 毛茛科 (Ranunculaceae, $n = 11$ 种), 禾本科 (Gramineae, $n = 11$ 种), 蔷薇科 (Rosaceae, $n = 8$ 种), 出现率分别为 100%, 98.3%, 97.1%, 96.6% 和 96.6%。虽然高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*)、高山唐松草 (*Thalictrum alpinum*)、矮嵩草 (*Kobresia humilis*) 等植物分布范围较广, 但并未发现在所有样方中均存在的种。阳坡与阴坡的物种分布有一定差异, 其中车前科 (Plantaginaceae)、胡颓子科 (Elaeagnaceae)、藜科 (Chenopodiaceae)、牻牛儿苗科 (Geraniaceae)、茜草科 (Rubiaceae)、茄科 (Solanaceae)、忍冬科 (Caprifoliaceae) 和川续断科 (Dipsacaceae) 物种仅分布在阳坡。

随海拔梯度的升高、草地退化程度的下降, 草地群落的优势种发生变化 (表 1)。阳坡样带植被组成成分异现象显示: 低海拔、极度退化样地上, 毒杂草黄帚囊吾 (*Ligularia virgaurea*) 占统治地位, 而随着海拔梯度升高、草地退化程度减弱, 适口性较好的多年生草甸草种珠牙蓼 (*Polygonum viviparum*) 和圆穗蓼 (*Polygonum macrophyllum*) 逐渐成为优势种; 随海拔升高、草地退化程度下降, 样方内总体的丰富度指数 (D_{Ma} -T) 和杂类草的 (D_{Ma} -F) 均随之降低 (图 1), 极度退化样地 (Y-1) 的植物群落总体物种丰富度指数 ($P < 0.01$)、杂类草物种丰富度指数 ($P < 0.01$) 和禾本科物种丰富度指数 (D_{Ma} -G) 高于其他样地, 重度退化样地 (Y-2) 的莎草科物种丰富度指数 (D_{Ma} -C) 显著高于极度和轻度退化样地 ($P < 0.05$)。相关分析表明, 样地内植物群落的总体物种丰富度指数与杂类草的物种丰富度指数显著相关 ($P < 0.01$)。

阴坡样带各植物功能群的物种丰富度指数沿海拔高度呈现如下规律: 植物群落总体物种丰富度指数 (D_{Ma} -T)、杂类草物种丰富度指数 (D_{Ma} -F)、禾本科物种多样性指数 (D_{Ma} -G) 均随海拔升高而升高, 莎草科的物种丰富度指数 (D_{Ma} -C) 在中海拔样地 (G-3) 最高。相关分析显示, 3 种功能群的丰富度指数与物种总丰富度间极显著相关 ($P < 0.01$), 各功能群的物种丰富度指数间也显著相关 ($P < 0.05$)。

2.2 不同海拔梯度/草地退化梯度上植物多样性及均匀度的变化

草地植物群落物种多样性随海拔高度、草地退化程度的变化而改变 (图 1)。在阳坡样带上, 随海拔升高、

表 1 不同海拔高度样地群落特征

Table 1 Features of plant communities of plots in different altitude									
样地编号 Serial number of plots	海拔 Altitude/mm	退化程度 Degradation degree	盖度 Coverage /%	优势种及其重要值 Dominant species and their important value (IV)					
Y-1	3770—3810	S-D	92	黄帚橐吾 <i>L. virgaurea</i>	13.4	矮火绒草 <i>L. nanum</i>	11.8	高山嵩草 <i>K. pygmaea</i>	8.3
Y-2	3811—3850	H-D	95.75	珠芽蓼 <i>P. viviparum</i>	16.2	黄帚橐吾 <i>L. virgaurea</i>	9.5	矮火绒草 <i>L. nanum</i>	4.8
Y-3	3851—3890	M-D	94.5	圆穗蓼 <i>P. macrophyllum</i>	35.0	黄帚橐吾 <i>L. virgaurea</i>	22.2	线叶嵩草 <i>K. capillifolia</i>	14.7
Y-4	3891—3930	L-D	97.25	圆穗蓼 <i>P. macrophyllum</i>	11.1	黄帚橐吾 <i>L. virgaurea</i>	9.2	乳白香青 <i>A. lactea</i>	6
G-1	3770—3810	N-D	97.7	矮火绒草 <i>L. nanum</i>	4.9	异叶青兰 <i>D. heterophyllum</i>	4.8	毛茛 <i>R. japonicus</i>	4.7
G-2	3811—3850	N-D	95.1	高山唐松草 <i>T. alpinum</i>	4.6	三穗苔草 <i>C. tristachya</i>	3.4	二叶獐芽菜 <i>S. bifolia</i>	2.9
G-3	3851—3890	N-D	95	三穗苔草 <i>C. tristachya</i>	4.5	高山唐松草 <i>T. alpinum</i>	4.3	狼毒大戟 <i>E. fischeriana</i>	3.5
G-4	3891—3930	N-D	97.5	三穗苔草 <i>C. tristachya</i>	4.3	高山唐松草 <i>T. alpinum</i>	3.8	狼毒大戟 <i>E. fischeriana</i>	3.4

Y 表示阳坡样地, G 表示阴坡样地; S-D: 极度退化, H-D: 重度退化, M-D: 中度退化, L-D: 轻度退化, N-D: 未退化

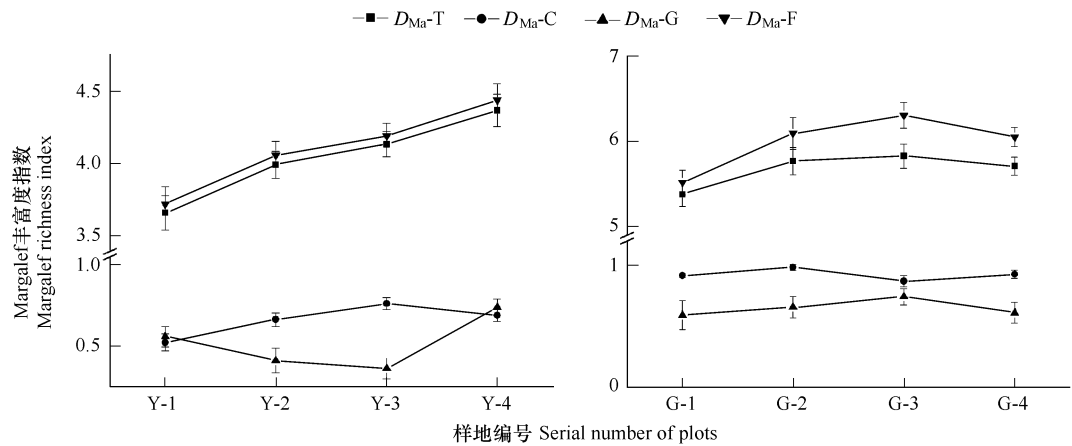


图 1 阳坡样地与阴坡样地植物丰富度指数的垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of the richness index on sunny and shade sides

图中数据为平均值±标准误; D_{Ma-T} 、 D_{Ma-C} 、 D_{Ma-G} 、 D_{Ma-F} 分别代表群落总体 Total、莎草科、禾本科及杂类草植物的 Margalef 丰富度指数 Margalef richness index

退化程度减弱,植物群落和杂类草类群的 Simpson 多样性指数(D)增加;莎草科类群的多样性指数在中海拔/中度退化样地最高($P<0.01$),在低海拔/极度退化样地最低;禾本科类群的多样性指数变化趋势相反,即在低海拔/极度退化样地最高,在中海拔/中度退化样地最低。植物群落和杂类草类群的 Pielou 均匀度指数(J)随海拔升高、退化程度减弱而增加,表现为中海拔/中度退化样地>高海拔/轻度退化样地>较低海拔/重度退化样地>低海拔/极度退化样地的趋势($P<0.01$);禾本科类群的均匀度指数呈“V 字型”变化趋势;莎草科类群的均匀度指呈“倒 V 字型”变化趋势,呈现出中海拔/中度退化样地>高海拔/轻度退化>较低海拔/重度退化样地>低海拔/极度退化样地的趋势($P<0.01$)。

在阴坡样带上,植物群落总体多样性指数在高海拔样地(G-4)最高,显著高于其他 3 个样地($P<0.05$);

莎草科类群的多样性指数在海拔梯度上的变化呈先下降后上升的趋势,最高值和最低值分别出现在低海拔样地(G-1)和中海拔(G-3)样地;禾本科类群的多样性指数在中海拔(G-3)样地最高;杂类草的多样性指数在海拔梯度上无显著变化($P>0.05$)。植物群落总体均匀度指数在低海拔样地(G-1)最高,显著高于其他3个样地($P<0.05$);莎草科类群的均匀度指数在海拔梯度上的变化趋势与多样性指数相同;禾本科类群均匀度指数在较低海拔样地(G-2)最高;杂类草的均匀度指数在海拔梯度上无显著变化($P>0.05$)。

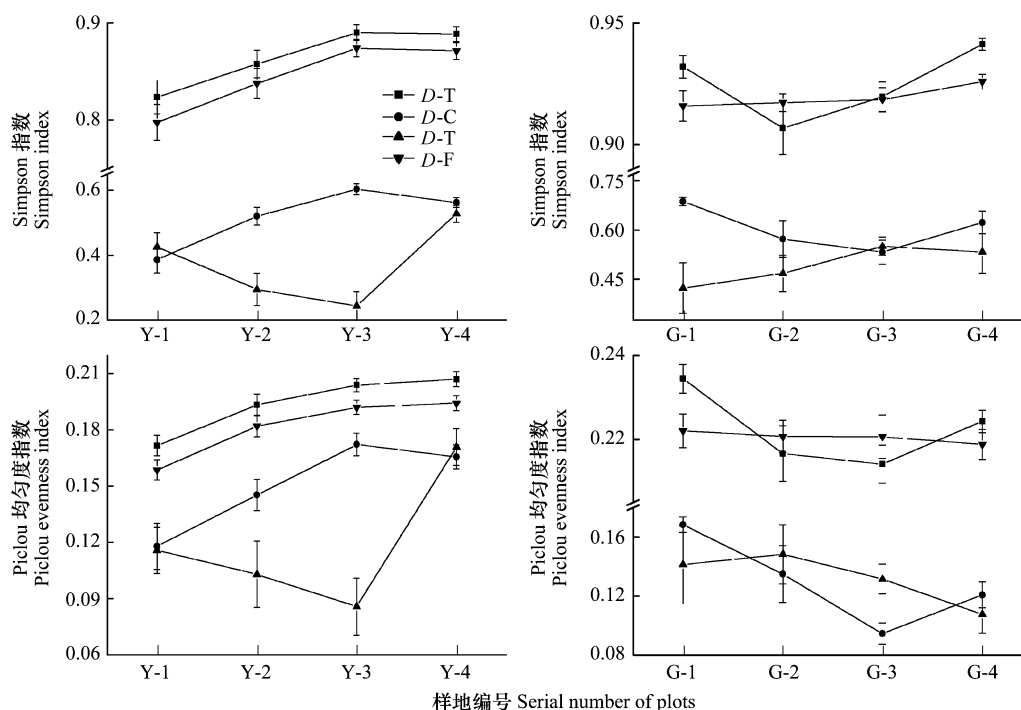


图2 阳坡样地与阴坡样地植物多样性指数的垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of the diversity indexes on sunny and shade sides

图中数据为平均值 $\pm$ 标准误差;D-T、D-C、D-G、D-F 分别代表群落总体、莎草科、禾本科及杂类草植物的 Simpson 指数 Simpson index;J-T、J-C、J-G、J-F 分别代表群落总体、莎草科、禾本科及杂类草植物的 Pielou 均匀度指数

2.3 植物多样性指数间的相关关系

相关分析结果表明(表2),植物群落和杂类草类群的物种丰富度指数、多样性指数和均匀度指数之间的相关关系类似,即物种丰富度指数与多样性指数和 Pielou 均匀度指数之间呈负相关关系($P<0.01$),而多样性指数和均匀度指数之间呈正相关关系($P<0.01$);禾本科类群的物种丰富度指数、多样性指数和均匀度指数之间均呈正相关关系($P<0.01$);莎草科类群物种的丰富度指数与多样性指数和均匀度指数之间无显著相关性;杂类草类群的多样性指数和均匀度指数均与植物群落总体多样性指数和均匀度指数都呈显著相关关系($P<0.01$),而另外两类功能群的多样性指数和均匀度指数与植物群落总体多样性指数和均匀度指数无显著相关性。

相关分析结果表明(表3),植物群落的总体多样性指数与莎草科、杂类草类群的多样性指数呈显著正相关关系($P<0.01$),植物群落的总体均匀度指数与莎草科、杂类草类群的均匀度指数呈显著正相关关系($P<0.01$);物群落的总体物种丰富度与总体均匀度指数间呈负相关关系($P<0.05$);莎草科类群的丰富度、多样性指数和均匀度指数间呈显著正相关关系($P<0.01$)。

不同类功能群物种其多样性指数间的相关性并不一致,这与其他研究^[22-23]所得出的 Margalef 指数与 Simpson 指数显著相关,Pielou 指数与各类多样性指数不相关的结论有所不同。

表 2 阳坡植物物种多样性指数相关关系

Table 2 The correlation among the diversity indexes on the sunny side

	$D_{Ma}-C$	$D_{Ma}-G$	$D_{Ma}-F$	$D-T$	$D-C$	$D-G$	$D-F$	$J-T$	$J-C$	$J-G$	$J-F$
$D_{Ma}-T$	0.44 **	0.32 **	1.00 **	0.50 **	0.49 **	0.25 **	0.49 **	0.67 **	0.39 **	0.31 **	0.66 **
$D_{Ma}-C$		0.00	0.43 **	0.26 **	0.87 **	-0.04	0.24 **	0.27 **	0.91 **	-0.01	0.24 **
$D_{Ma}-G$			0.33 **	0.03	-0.02	0.94 **	-0.01	0.10	0.01	0.95 **	0.03
$D_{Ma}-F$				0.51 **	0.48 **	0.26 **	0.49 **	0.68 **	0.38 **	0.31 **	0.67 **
$D-T$					0.30 **	0.05	0.99 **	0.91 **	0.26 **	0.07	0.91 **
$D-C$						-0.06	0.29 **	0.34 **	0.89 **	0.00	0.31 **
$D-G$							0.01	0.09	-0.01	0.95 **	0.02
$D-F$								0.88 **	0.26 **	0.05	0.91 **
$J-T$									0.26 **	0.12	0.99 **
$J-C$										0.03	0.24 **
$J-G$											0.07

$D_{Ma}-T$ 、 $D_{Ma}-C$ 、 $D_{Ma}-G$ 、 $D_{Ma}-F$ 分别代表群落总体、莎草科、禾本科及杂类草植物的 Margalef 丰富度指数; $D-T$ 、 $D-C$ 、 $D-G$ 、 $D-F$ 分别代表群落总体、莎草科、禾本科及杂类草植物的 Simpson 指数; $J-T$ 、 $J-C$ 、 $J-G$ 、 $J-F$ 分别代表群落总体、莎草科、禾本科及杂类草植物的 Pielou 均匀度指数;

** 相关分析显著性水平 $P < 0.01$, * 相关分析显著性水平 $P < 0.05$

表 3 阴坡植物物种多样性指数相关关系

Table 3 The correlation among the diversity indexes on the shade side

	$D_{Ma}-C$	$D_{Ma}-G$	$D_{Ma}-F$	$D-T$	$D-C$	$D-G$	$D-F$	$J-T$	$J-C$	$J-G$	$J-F$
$D_{Ma}-T$	0.21	0.37 **	0.95 **	0.20	-0.07	0.50 **	0.37 **	0.14	-0.17	0.35 *	0.33 *
$D_{Ma}-C$		0.04	0.10	0.25	0.52 **	0.01	-0.05	0.30 *	0.50 **	0.11	-0.01
$D_{Ma}-G$			0.37 **	-0.07	-0.15	0.86 **	-0.25	-0.17	-0.17	0.85 **	-0.23
$D_{Ma}-F$				0.02	-0.27	0.51 **	0.41 **	-0.06	-0.42 **	0.28	0.37 **
$D-T$					0.63 **	0.08	0.39 **	0.80 **	0.45 **	-0.03	0.20
$D-C$						-0.20	-0.06	0.74 **	0.89 **	0.07	0.14
$D-G$							-0.06	-0.15	-0.29 *	0.78 **	-0.20
$D-F$								0.33 *	-0.20	-0.27	0.71 **
$J-T$									0.68 **	0.05	0.53 **
$J-C$										0.11	0.03
$J-G$											-0.09

$D_{Ma}-T$ 、 $D_{Ma}-C$ 、 $D_{Ma}-G$ 、 $D_{Ma}-F$ 分别代表群落总体、莎草科、禾本科及杂类草植物的 Margalef 丰富度指数; $D-T$ 、 $D-C$ 、 $D-G$ 、 $D-F$ 分别代表群落总体、莎草科、禾本科及杂类草植物的 Simpson 指数; $J-T$ 、 $J-C$ 、 $J-G$ 、 $J-F$ 分别代表群落总体、莎草科、禾本科及杂类草植物的 Pielou 均匀度指数;

** 相关分析显著性水平 $P < 0.01$, * 相关分析显著性水平 $P < 0.05$

2.4 植物多样性与环境因子、干扰强度的关系

因子分析结果表明,阳坡样带上环境因子与干扰强度间存在很强的共线性关系,所以对海拔梯度(AL)、裸斑面积(BP)、坡度(SL)、土壤总碳(SC)、总氮含量(SN)、土壤 pH 值(pH)、土壤总可溶性盐含量(TDS)、鼠类干扰强度(RI)、放牧强度(GI)9 个因素提取公因子。提取的 3 个主成分 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 的特征根分别为 5.497, 1.966 和 1.537,可以解释总变异量的 61.081%, 21.843%, 17.076%, 累计解释变量变异 100%。公因子的具体表达式如下:

$$Z_1 = -0.211AL + 0.320BP - 0.166SL + 0.150SC + 0.089SN - 0.013pH + 0.010TDS + 0.259RI + 0.209GI + \xi_1$$

$$Z_2 = -0.021AL + 0.122BP + 0.185SL + 0.463SC + 0.453SN - 0.016pH - 0.088TDS + 0.100RI + 0.021GI + \xi_2$$

$$Z_3 = -0.029AL - 0.202BP + 0.457SL - 0.096SC + 0.041SN + 0.408pH + 0.329TDS - 0.020RI + 0.032GI + \xi_3$$

Z_1 代表样地裸斑面积、鼠类干扰强度和放牧强度,其因子载荷分别为 0.992、0.970 和 0.920; Z_2 代表土壤总碳、总氮含量,因子载荷分别为 0.976 和 0.984; Z_3 代表土壤 pH 值、TDS 含量和坡度,因子载荷分别为

0.879、0.760 和 0.733。利用提取出的 3 个主成分对样地植物群落及功能群物种丰富度指数、多样性指数和均匀度指数做偏相关分析结果表明:植物群落总体丰富度指数($S-T$)、禾本科类群丰富度指数($S-G$)、杂类草类群丰富度指数($S-F$)、植物群落总体多样性指数($D-T$)、莎草科类群多样性指数($D-C$)、杂类草类群多样性指数($D-F$)、植物群落总体均匀度指数($J-T$)、莎草科类群均匀度指数($J-C$)、杂类草类群均匀度指数($J-F$)皆与第一主成分 Z_1 极显著相关(表 4)。从这一结果可以推断出,裸斑面积、鼠类活动强度及放牧干扰强度对草地植被多样性的影响最为强烈;对莎草科类群丰富度影响最为严重的是第三主成分,即土壤 pH 值和 TDS;对禾本科类群的多样性指数和均匀度指数有极显著影响的是第二主成分,即土壤总碳、氮含量;对杂类草类群有极显著影响的是第一主成分,包括裸斑面积、鼠类干扰强度和放牧强度。

表 4 主成分与多样性指数的偏相关系数

Table 4 The partial correlation coefficient among diversity indexes and main factors

	$D_{Ma}-T$	$D_{Ma}-C$	$D_{Ma}-G$	$D_{Ma}-F$	$D-T$	$D-C$
Z_1	0.376 **	-0.062	0.442 **	0.352 **	-0.362 **	-0.475 **
Z_2	-0.027	-0.041	0.073	-0.028	-0.012	-0.068
Z_3	-0.026	0.237 **	-0.366 **	-0.018	-0.012	0.053
Z_4	0.524 **	0.318 *	0.643 **	0.450 **	0.343 *	-0.085
Z_5	-0.366 *	-0.475 **	-0.242	-0.118	0.391 **	0.360 *
	$D-G$	$D-F$	$J-T$	$J-C$	$J-G$	$J-F$
Z_1	0.076	-0.379 **	-0.468 **	-0.397 **	-0.064	-0.478 **
Z_2	0.323 **	-0.016	0.053	-0.047	0.314 **	0.046
Z_3	-0.304 **	-0.036	0.053	-0.027	-0.225 *	0.010
Z_4	0.209	0.223	-0.091	-0.384 **	-0.237	-0.069
Z_5	-0.118	-0.014	0.432 **	0.381 **	-0.043	0.030

$D_{Ma}-T$ 、 $D_{Ma}-C$ 、 $D_{Ma}-G$ 、 $D_{Ma}-F$ 分别代表群落总体、莎草科、禾本科及杂类草植物的 Margalef 丰富度指数; $D-T$ 、 $D-C$ 、 $D-G$ 、 $D-F$ 分别代表群落总体、莎草科、禾本科及杂类草植物的 Simpson 指数; $J-T$ 、 $J-C$ 、 $J-G$ 、 $J-F$ 分别代表群落总体、莎草科、禾本科及杂类草植物的 Pielou 均匀度指数;

** 偏相关分析显著性水平 $P<0.01$, * 偏相关分析显著性水平 $P<0.05$

对于阴坡灌丛草甸内的草本植被,由于放牧干扰以及鼠类活动较少且基本没有裸斑,因此干扰强度对植物多样性的影响可以忽略不计。但因子分析结果表明,环境因子间仍存在一定的共线性,因此对海拔梯度、坡度、土壤总碳、总氮含量、土壤 pH 值及土壤总可溶性盐 6 个要素提取公因子。提取的主成分 Z_4 和 Z_5 的特征根为 4.607 和 1.175,分别解释所有变量变异的 76.790% 和 19.370%,累计解释 96.370%。公因子的具体表达式如下:

$$Z_4 = 0.182AL - 0.210SL + 0.236SC + 0.227SN + 0.196pH + 0.077TDS + \xi_4$$

$$Z_5 = -0.22AL - 0.010SL + 0.162SC + 0.223SN - 0.146pH + 0.833TDS + \xi_5$$

Z_4 主要代表海拔梯度、土壤总碳、总氮以及 pH 值,其因子载荷分别为 0.931、0.995、0.929、0.958, Z_5 主要代表土壤 TDS,其因子载荷为 0.996。利用提取的公因子与样地植被物种多样性指数做偏相关分析结果表明:植物群落总体丰富度指数 $D_{Ma}-T$ 、禾本科类群丰富度指数 $D_{Ma}-G$ 、杂类草类群丰富度指数 $D_{Ma}-F$ 、莎草科类群均匀度指数($J-C$)与第四主成分 Z_4 极显著正相关,植物群落总体多样性指数($D-T$)、莎草科类群多样性指数($D-C$)、植物群落总体均匀度指数($J-T$)与第五主成分 Z_5 有较显著的相关性,莎草科类群丰富度指数 $D_{Ma}-C$ 与 Z_5 有极显著负相关关系(表 2)。从这一结果可以推断出,海拔梯度、土壤碳氮含量以及 pH 值对阴坡灌丛草甸草本植被的多样性影响相对较大;土壤 TDS 对莎草科类群的物种丰富度有负面影响,而对多样性指数有正面影响;杂类草的物种多样性指数与均受海拔梯度、土壤总碳、总氮、pH 值及土壤 TDS 的影响。

3 讨论与结论

植物群落多样性随海拔高度的变化规律一直是生态学家研究的热点科学问题,其研究对象涉及森林、草地、灌丛等诸多植被类型^[24-26]。但是迄今为止,草地植物群落生物多样性随海拔高度的变化规律尚无科学定

论:一些学者认为生物多样性分布具有中海拔高度膨胀现象^[15,27];另外一些学者认为生物多样性在海拔梯度上呈现偏峰格局^[28];还有部分学者认为生物多样性随海拔梯度的变化无明显规律^[29-30]。本研究结果表明:阳坡样带草本植物群落的总物种丰富度指数和杂类草的物种丰富度指数随海拔升高而降低,而二者的多样性指数和均匀度指数随海拔高度升高而增加;阴坡样带草本植物群落的总物种丰富度在整个海拔梯度范围内变化较小,多样性指数和均匀度指数则呈“V 字型”变化趋势,即中海拔高度膨胀趋势。可见,阴阳坡草本植物群落生物多样性随海拔高度的变化并无统一规律。从本研究因子分析结果看,草地植物群落生物多样性的空间分异特征是地理环境(海拔高度、坡度)、土壤环境(土壤养分、土壤 pH、土壤盐分)及干扰强度等因素综合作用的结果。这一发现不但印证了前人^[31-32]关于“植物群落的生物多样性与水热分布、地形、土壤养分状况、土壤微生物活动、动物干扰以及人为扰动等诸多因素有关”的结论,而且可以很好地解释为什么“迄今为止草地植物群落随海拔高度变化规律尚无定论”的原因。

本研究中在阳坡海拔梯度与干扰强度梯度和草地退化程度高度重合,因此很难区分三者的单因素作用结果。在阳坡样带上,随海拔高度升高、干扰强度降低、草地退化程度减弱,草地植物群落和杂类草类群的多样性指数和均匀度指数增加,说明减轻干扰强度、维系草地健康有利于高海拔地区草地植物群落多样性的保育。在中海拔、中度干扰、中度退化的草地上,顶极/优势植被功能群——莎草科植物的物种多样性和均匀度最高,而亚顶极/建群植被功能群——禾本科植物的多样性和均匀度较低,说明中度干扰有利于草地原生植被植物多样性的维持,这一结论有力地支持了中度干扰假说。从不同功能群植被的多样性指数和均匀度指数在海拔梯度上的分异状况看,莎草科植被和禾本科植被较杂类草植被生物多样性的分异显著,说明不同功能群的植物对干扰和环境变化的敏感性不同^[33];禾本科类群的物种多样性与土壤碳、氮含量极显著相关,与土壤 pH 和 TDS 的量显著负相关,这说明禾本科物种的分布受土壤条件的影响较大。

本研究通过分析环境因子和干扰强度对生物多样性变化的作用效应发现,影响阳坡样带植物群落物种多样性的主要因素是裸斑面积、放牧强度及鼠洞密度,放牧及鼠类活动比环境因子对草地群落多样性的影响更为明显和剧烈。这一结论也充分印证了国外学者在地中海半干旱区典型草原的研究发现,强度干扰比环境因子对退化草地植物多样性的影响更为强烈^[20]。我国其他学者的研究也表明,草本植物物种的丰富度因放牧强度和草地生物量的变化而增加或减少^[34-35]。由此可见,放牧作为一种重要的人类干扰,是草地生态系统植物多样性变化的重要原因之一,它通过啃食、践踏作用干扰草地环境,使得草地群落的结构和多样性发生改变^[17,36-39]。此外,鼠类活动干扰也是改变草地生物多样性的因子之一,啮齿类动物草地除了大量啃食牧草外,还通过挖掘活动对破坏草地土壤结构,减小放牧可利用面积,加重放牧压力,加速草地植被退化^[40],增加草地裸斑面积^[41]。因此,适度放牧和控制鼠类活动是维持草地生物多样性的措施。阴坡样带受放牧和鼠类活动干扰影响小,无裸斑出现,影响草地植被多样性变化的主要因子为海拔梯度、土壤碳、氮以及 pH 值和坡度环境因子,但其对各类功能群物种多样性的影响不同,这些环境因子的梯度增加会导致莎草科植物类群的物种多样性减少、禾本科类群的物种多样性增加,草地群落的多样性格局因此发生改变。

References:

- [1] Liu J Y, Xu X L, Shao Q Q. Grassland degradation in the “Three-River Headwaters” region, Qinghai Province. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(3): 259-273.
- [2] Wang J B, Liu J Y, Shao Q Q, Liu R G, Fan J W, Chen Z Q. Spatial temporal patterns of net primary productivity for 1988—2004 based on GLOPEM-CEVSA model in the “Three-River Headwaters” region of Qinghai Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(2): 254-269.
- [3] Guo Z G, Cheng G D, Wang G X. Plant diversity of alpine Kobresia meadow in the northern region of the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(1): 95-100.
- [4] Dong S K, Wen L, Zhu L, Li X Y. Implication of coupled natural and human systems in sustainable rangeland ecosystem management in HKH region. *Frontiers of Earth Science in China*, 2010, 4(1): 42-50.
- [5] Dong S C, Zhou C J, Wang H Y. Ecological crisis and countermeasures of the Three Rivers Headstream Regions. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(6): 713-720.

- [6] Loreau M. Biodiversity and ecosystem functioning: recent theoretical advances. *Oikos*, 2000, 91: 3-17.
- [7] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime J P, Hector A, Hooper D U, Huston M A, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D, Wardle D A. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science*, 2001, 294(5543): 804-808.
- [8] Bai Y F, Li L H, Huang J H, Chen Z Z. The influence of plant diversity and functional composition on ecosystem stability of four *Stipa* communities in the Inner Mongolia Plateau. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(3): 280-287.
- [9] Troumbis A Y. No-observational evidence for diversity-enhancing productivity in Mediterranean shrublands?. A reply to Wardle. *Oecologia*, 2001, 129(4): 622-623.
- [10] Wardle D A. No observational evidence for diversity enhancing productivity in Mediterranean shrublands. *Oecologia*, 2001, 129(4): 620-621.
- [11] Huston M A. Hidden treatments in ecological experiments: re-evaluating the ecosystem function of biodiversity. *Oecologia*, 1997, 110(4): 449-460.
- [12] Tilman D. Causes, consequences and ethics of biodiversity. *Nature*, 2000, 405(6783): 208-211.
- [13] Hector A, Bazeley-White E, Loreau M, Otway S, Schmid B. Overyielding in grassland communities: testing the sampling effect hypothesis with replicated biodiversity experiments. *Ecology Letters*, 2002, 5(4): 502-511.
- [14] Naeem S, Li S B. Biodiversity enhances ecosystem reliability. *Nature*, 1997, 390(6659): 507-509.
- [15] Wang C T, Wang Q J, Long R J, Jing Z C, Shi H L. Changes in plant species diversity and productivity along an elevation gradient in an alpine meadow. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(2): 240-245.
- [16] Luo Y H, Zhou J J, Wang H Y, Ma J Y, Du G Z. The relation of nutrients and plant species diversity in an alpine meadow. *Journal of Lanzhou University(Natural Science Edition)*, 2004, 40(2): 84-91.
- [17] Yuan J L, Jiang X L, Huang W B, Wang G. Effects of grazing intensity and grazing season on plant species diversity in alpine meadow. *Acta Pratacultural Science*, 2004, 13(3): 16-21.
- [18] Zhang Y M. Effect of plateau Zokor on characters and succession of plant communities in alpine meadow. *Zoological Research*, 1999, 20(6): 435-440.
- [19] Zong W J, Jiang X L, Yan L. Effect of plateau zokor disturbance on species diversity of plant communities in alpine meadow. *Pratacultural Science*, 2006, 23(10): 68-72.
- [20] Maestre F T. On the importance of patch attributes, environmental factors and past human impacts as determinants of perennial plant species richness and diversity in Mediterranean semiarid steppes. *Diversity and Distribution*, 2004, 10(1): 21-29.
- [21] Ma Y S, Lang B N, Li Q Y, Shi J J, Dong Q M. Study on rehabilitating and rebuilding technologies for degenerated alpine meadow in the Changjiang and Yellow river source region. *Pratacultural Science*, 2002, 19(9): 1-5.
- [22] Dong M. Survey, Observation and Analysis of Terrestrial Biocommunities. Beijing: China Standard Press, 1997.
- [23] Yang L M, Han M, Li J D. Plant diversity change in grassland communities along a grazing disturbance gradient in the northeast China transect. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(1): 110-114.
- [24] Li K H, Hu Y K, Adeli M D, Yu J M, Gao G G. Species diversity and above-ground biomass of alpine grassland on the southern slope of Tianshan Mountain. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(1): 155-159.
- [25] He J S, Chen W L. A review of gradient changes in species diversity of land plant communities. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(1): 91-99.
- [26] Hu Y K, Li K H, Adeli M D, Liu Y Y, Fan Y G, Wang X, Gao G G. Plant species diversity of alpine grasslands on southern slope of Tianshan Mountain along altitude gradient. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(2): 182-186.
- [27] Gao Y, Ci H X, Qiu Z L, Chen Y F. Plant diversity and its elevational gradient patterns in Mengshan Mountain, Shandong, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6377-6384.
- [28] Wang G H. Species diversity of plant communities along an altitudinal gradient in the middle section of northern slopes of Qilian Mountains, Zhangye, Gansu, China. *Chinese Biodiversity*, 2002, 10(1): 7-14.
- [29] Wang Z H, Chen A P, Piao S L, Fang J Y. Pattern of species richness along an altitudinal gradient on Gaoligong Mountains, Southwest China. *Chinese Biodiversity*, 2004, 12(1): 82-88.
- [30] Ito S. Species turnover and diversity patterns along an evergreen broad-leaved forest coenocline. *Journal of Vegetation Science*, 1991, 2(4): 477-484.
- [31] Wilson J B, Sykes M T. Some tests for niche limitation by examination of species diversity in the Dunedin area, New Zealand. *New Zealand Journal of Botany*, 1988, 26: 237-244.
- [32] Feng Y, Xu P, An S Z, Liu C E, Sun Z J. Study on the diversity of steppe types in the middle section of northern slope of the Tian shan Mountain. *Arid Zone Research*, 2005, 22(2): 225-230.
- [33] Li L J, Zeng D H, Yu Z Y, Ai G Y, Yang D, Mao R. Effects of nitrogen addition on grassland species diversity and productivity in Keerqin Sandy Land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1838-1844.
- [34] Yang D L, Han G D, Hu Y G, Wuyun G R L. Effects of grazing intensity on plant diversity and aboveground biomass of *Stipa baicalensis* grassland. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(12): 1470-1475.
- [35] Wang C T, Long R J, Wang Q J, Jing Z C, Ding L M. Relationship between species diversity and productivity in four types of alpine meadow plant communities. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(5): 483-487.

- [36] Zheng W, Zhu J Z, Pan C D. Multi-scale response of plant diversity in grassland ecosystem to anthropogenic disturbances. *Pratacultural Science*, 2009, 26(8): 72-80.
- [37] Wang R Z. Effects of disturbances on species diversity in grassland ecosystems. *Journal of Northeast Normal University(Natural Science Edition)*, 1996, (3): 112-116.
- [38] Yang L M, Li J D, Yang Y F. β diversity of grassland communities along gradient of grazing disturbance. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(4): 442-446.
- [39] Yan R R, Wei Z J, Han G D, Wang P F, Zhou Z Y. Study on communities diversity of different grazing system in desert steppe. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(7): 111-115.
- [40] Wang Y S, Hong F C, Jiang W L, Wang K. Responses of *Trifolium pratense* mixed communities to long-term moderate grazing in Karst region. *Ecology and Environment*, 2007, 16(1): 117-124.
- [41] Zhou H K, Zhao X Q, Zhou L, Tang Y H, Liu W, Shi Y. Application of analytic hierarchy process on the alpine grassland degradation in the source region of the Yangtze and Yellow Rivers. *Resources Science*, 2005, 27(4): 63-68.

参考文献:

- [2] 王军邦, 刘纪远, 邵全琴, 刘荣高, 樊江文, 陈卓奇. 基于遥感-过程耦合模型的1988—2004年青海三江源区净初级生产力模拟. *植物生态学报*, 2009, 33(2): 254-269.
- [3] 郭正刚, 程国栋, 王根绪. 青藏高原北部高海拔地区嵩草甸植物多样性分析. *冰川冻土*, 2004, 26(1): 95-100.
- [5] 董锁成, 周长进, 王海英. “三江源”地区主要生态环境问题与对策. *自然资源学报*, 2002, 17(6): 713-720.
- [15] 王长庭, 王启基, 龙瑞军, 景增春, 史惠兰. 高寒草甸群落植物多样性和初级生产力沿海拔梯度变化的研究. *植物生态学报*, 2004, 28(2): 240-245.
- [16] 罗燕江, 周九菊, 王海洋, 马建云, 杜国祯. 高寒草甸植物多样性与营养的关系(英文). *兰州大学学报(自然科学版)*, 2004, 40(2): 84-91.
- [17] 袁建立, 江小蕾, 黄文冰, 王刚. 放牧季节及放牧强度对高寒草地植物多样性的影响. *草业学报*, 2004, 13(3): 16-21.
- [18] 张堰铭. 高原鼯鼠对高寒草甸群落特征及演替的影响. *动物学研究*, 1999, 20(6): 435-440.
- [19] 宗文杰, 江小雷, 严林. 高原鼯鼠的干扰对高寒草地植物群落物种多样性的影响. *草业科学*, 2006, 23(10): 68-72.
- [21] 马玉寿, 郎百宁, 李青云, 施建军, 董全民. 江河源区高寒草甸退化草地恢复与重建技术研究. *草业科学*, 2002, 19(9): 1-5.
- [22] 董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [23] 杨利民, 韩梅, 李建东. 中国东北样带草地群落放牧干扰植物多样性的变化. *植物生态学报*, 2001, 25(1): 110-114.
- [24] 李凯辉, 胡玉昆, 阿德力·麦地, 于建梅, 高国刚. 天山南坡高寒草地物种多样性及地上生物量研究. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(1): 155-159.
- [25] 贺金生, 陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征. *生态学报*, 1997, 17(1): 91-99.
- [26] 胡玉昆, 李凯辉, 阿德力·麦地, 柳妍妍, 范永刚, 王鑫, 高国刚. 天山南坡高寒草地海拔梯度上的植物多样性变化格局. *生态学杂志*, 2007, 26(2): 182-186.
- [27] 高远, 慈海鑫, 邱振鲁, 陈玉峰. 山东蒙山植物多样性及其海拔梯度格局. *生态学报*, 2009, 29(12): 6377-6384.
- [28] 王国宏. 祁连山北坡中段植物群落多样性的垂直分布格局. *生物多样性*, 2002, 10(1): 7-14.
- [29] 王志恒, 陈安平, 朴世龙, 方精云. 高黎贡山种子植物物种丰富度沿海拔梯度的变化. *生物多样性*, 2004, 12(1): 82-88.
- [32] 冯纛, 许鹏, 安沙舟, 刘长娥, 孙宗玖. 天山北坡中段草地类型 α 多样性研究. *干旱区研究*, 2005, 22(2): 225-230.
- [33] 李禄军, 曾德慧, 于占源, 艾桂艳, 杨丹, 毛瑛. 氮素添加对科尔沁沙质草地物种多样性和生产力的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1838-1844.
- [34] 杨殿林, 韩国栋, 胡跃高, 乌云格日勒. 放牧对贝加尔针茅草原群落植物多样性和生产力的影响. *生态学杂志*, 2006, 25(12): 1470-1475.
- [35] 王长庭, 龙瑞军, 王启基, 景增春, 丁路明. 高寒草甸不同草地群落物种多样性与生产力关系研究. *生态学杂志*, 2005, 24(5): 483-487.
- [36] 郑伟, 朱进忠, 潘存德. 草地植物多样性对人类干扰的多尺度响应. *草业科学*, 2009, 26(8): 72-80.
- [37] 王仁忠. 干扰对草地生态系统生物多样性的影响. *东北师大学报(自然科学版)*, 1996, (3): 112-116.
- [38] 杨利民, 李建东, 杨允菲. 草地群落放牧干扰梯度 β 多样性研究. *应用生态学报*, 1999, 10(4): 442-446.
- [39] 闫瑞瑞, 卫智军, 韩国栋, 王鹏飞, 周忠义. 荒漠草原不同放牧制度群落多样性研究. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(7): 111-115.
- [40] 王元素, 洪绶曾, 蒋文兰, 王堃. 喀斯特地区红三叶混播草地群落对长期适度放牧的响应. *生态环境*, 2007, 16(1): 117-124.
- [41] 周华坤, 赵新全, 周立, 唐艳鸿, 刘伟, 师燕. 层次分析法在江河源区高寒草地退化研究中的应用. *资源科学*, 2005, 27(4): 63-68.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 7 April, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Seasonal variation of soil nitrogen pools and microbes under natural evergreen broadleaved forest and its artificial regeneration forests in Southern Sichuan Province, China	GONG Wei, HU Tingxing, WANG Jingyan, et al (1763)
Sensitivity analysis for main factors influencing <i>NPP</i> of forests simulated by IBIS in the eastern area of Northeast China	LIU Xi, GUO Qingxi, LIU Jingwei (1772)
Diurnal changes of photosynthetic characteristics of <i>Hippophae rhamnoides</i> and the relevant environment factors at different slope locations	JIN Tiantian, FU Bojie, LIU Guohua, et al (1783)
Interactive effects of nitrogen and sulfur on the reproduction, biomass accumulation and allocation of the clonal plant <i>Spartina alterniflora</i>	GAN Lin, ZHAO Hui, QING Hua, et al (1794)
Difference in leaf photosynthetic capacity between pima cotton (<i>Gossypium barbadense</i>) and upland cotton (<i>G. hirsutum</i>) and analysis of potential constraints	ZHANG Yali, YAO Hesheng, LUO Yi, et al (1803)
Effects of shades on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of <i>Forsythia suspensa</i>	WANG Jianhua, REN Shifu, SHI Baosheng, et al (1811)
Growth and metal uptake of three woody species in lead/zinc and copper mine tailing	SHI Xiang, CHEN Yitai, WANG Shufeng, et al (1818)
GMP particles size distribution in grains of wheat in relation to application of nitrogen fertilizer	WANG Guangchang, WANG Zhenlin, CUI Zhiqing, et al (1827)
Damaging mechanisms of peanut (<i>Arachis hypogaea</i> L.) photosystems caused by high-temperature and drought under high irradiance	QIN Liqin, ZHANG Yueli, GUO Feng, et al (1835)
The effect of natural factors and disturbance intensity on spacial heterogeneity of plant diversity in alpine meadow	WEN Lu, DONG Shikui, ZHU Lei, et al (1844)
Modeling changes of net primary productivity of karst vegetation in southwestern China using the CASA model	DONG Dan, NI Jian (1855)
The characteristics of <i>Magnolia liliflora</i> transpiration and its impacting factors in Beijing City	WANG Hua, OUYANG Zhiyun, REN Yufen, et al (1867)
Ecological effects of balanced fertilization on red earth paddy soil with P-deficiency	CHEN Jianguo, ZHANG Yangzhu, ZENG Xibai, et al (1877)
Effects of planting patterns on water use efficiency in winter wheat	QI Lin, CHEN Yuhai, ZHOU Xunbo, et al (1888)
Nitrous oxide emissions from winter wheat field in the Loess Plateau	PANG Junzhu, WANG Xiaoke, MU Yujing, et al (1896)
Effects of hardening by pre-anthesis waterlogging on grain yield and quality of post-anthesis waterlogged wheat (<i>Triticum aestivum</i> L. cv Yangmai 9)	LI Chengyong, CAI Jian, JIANG Dong, et al (1904)
Effects of simulated acid rain with lower S/N ratio on gas exchange and membrane of three dominant species in subtropical forests	FENG Lili, YAO Fangfang, WANG Xihua, et al (1911)
Molluscicidal efficacy of <i>Nerium indicum</i> cardiac glycosides on <i>Pomacea canaliculata</i> and its effects on rice seedling	DAI Lingpeng, LUO Weihua, WANG Wanxian (1918)
Spatial gradients pattern of landscapes and their relations with environmental factors in Haihe River basin	ZHAO Zhixuan, ZHANG Biao, JIN Xin, et al (1925)
The assessment of forest ecosystem services evaluation for shrubbery-economic forest-bamboo forest in China	WANG Bing, WEI Jiangsheng, HU Wen (1936)
Evaluation on service value of ecosystem of Peri-urban transition zone lake: a case study of Yandong Lake in Wuhan City	WANG Fengzhen, ZHOU Zhixiang, ZHENG Zhongming (1946)
Explaining the abundance-distribution relationship of plant species with niche breadth and position in the Yellow River Delta	YUAN Xiu, MA Keming, WANG De (1955)
Forestland boundary dynamics based on an landscape accessibility analysis in Guangzhou, China	ZHU Yaojun, WANG Cheng, JIA Baoquan, et al (1962)
Changes in invasion characteristics of <i>Dendroctonus valens</i> after introduction into China	PAN Jie, WANG Tao, WEN Junbao, et al (1970)
Population genetic diversity in Tibet red deer (<i>Cervus elaphus wallichi</i>) revealed by mitochondrial <i>Cyt b</i> gene analysis	LIU Yanhua, ZHANG Minghai (1976)
Multi-scales analysis on diversity of desert rodent communities under different disturbances	YUAN Shuai, WU Xiaodong, FU Heping, et al (1982)
Cave-site selection of Qinling zokors with their prevention and control	LU Qingbin, ZHANG Yang, ZHOU Caiquan (1993)
The habitat characteristics of Eurasian badger in Beijing-Hangzhou Grand Canal embankment	YIN Baofa, LIU Yuqing, LIU Guoxing, et al (2002)
Review and Monograph	
Electron transfer mechanism of extracellular respiration: a review	MA Chen, ZHOU Shungui, ZHUANG Li, et al (2008)
The biochemical mechanism and application of anammox in the wastewater treatment process	WANG Hui, LIU Yanping, TAO Ying, et al (2019)
Discussion	
Evaluation of the forest ecosystem services in Haihe River Basin, China	BAI Yang, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (2029)
Scientific Note	
Effects of body size and salinity on oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of <i>Macra chinensis</i> Philippi	ZHAO Wen, WANG Yaqian, WEI Jie, et al (2040)
Study on microzooplankton grazing in shrimp pond among middle and late shrimp culture period	ZHANG Litong, SUN Yao, ZHAO Congming, et al (2046)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任:孔红梅

执行编辑:刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 7 期 (2011 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 7 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元