

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第8期 Vol.33 No.8 **2013**

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 33 卷 第 8 期 2013 年 4 月 (半月刊)

目 次

城市生态系统研究专题

- 城市生态系统:演变、服务与评价——“城市生态系统研究”专题序言 王效科 (2321)
- 城市生态景观建设的指导原则和评价指标 孙然好,陈爱莲,李 芬,等 (2322)
- 城市绿色空间格局的定量化方法研究进展 陶 宇,李 锋,王如松,等 (2330)
- 城市土地利用变化对生态系统服务的影响——以淮北市为例 赵 丹,李 锋,王如松 (2343)
- 基于市政综合监管信息的城市生态系统复杂性分析 董仁才,苟亚青,刘 昕 (2350)
- 原位生物技术对城市重污染河道底泥的治理效果 柳 敏,王如松,蒋 莹,等 (2358)
- 北京城区道路沉积物污染特性 任玉芬,王效科,欧阳志云,等 (2365)
- 绿地格局对城市地表热环境的调节功能 陈爱莲,孙然好,陈利顶 (2372)
- 北京城区气传花粉季节分布特征 孟 龄,王效科,欧阳志云,等 (2381)

个体与基础生态

- 三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响 徐 翠,张林波,杜加强,等 (2388)
- 土壤砷植物暴露途径的土壤因子模拟 线 郁,王美娥,陈卫平 (2400)
- 不同寄主植物对马铃薯甲虫的引诱作用 李 超,程登发,郭文超,等 (2410)
- 蒙古栎、白桦根系分解及养分动态 靳贝贝,国庆喜 (2416)
- 干旱和坡向互作对栓皮栎和侧柏生长的影响 王 林,冯锦霞,王双霞,等 (2425)
- 不同郁闭度下胸高直径对杉木冠幅特征因子的影响 符利勇,孙 华,张会儒,等 (2434)
- 驯化温度与急性变温对南方鲢幼鱼皮肤呼吸代谢的影响 鲜雪梅,曹振东,付世建 (2444)

种群、群落和生态系统

- 五鹿山国家级自然保护区物种多样性海拔格局 何艳华,闫 明,张钦弟,等 (2452)
- 玉龙雪山白水 1 号冰川退缩迹地的植被演替 常 丽,何元庆,杨太保,等 (2463)
- 五花米草海向入侵对土壤有机碳组分、来源和分布的影响 王 刚,杨文斌,王国祥,等 (2474)
- 南亚热带人工针叶纯林近自然改造早期对群落特征和土壤性质的影响 何友均,梁星云,覃 林,等 (2484)
- 入侵植物黄顶菊生长、再生能力对模拟天敌危害的响应 王楠楠,皇甫超河,李玉浸,等 (2496)
- 小兴安岭白桦次生林叶面积指数的估测 刘志理,金光泽 (2505)
- 草地植物群落最优分类数的确定——以黄河三角洲为例 袁 秀,马克明,王 德 (2514)
- 多毛类底栖动物在莱州湾生态环境评价中的应用 张 莹,李少文,吕振波,等 (2522)
- 马尾松人工林火烧迹地不同恢复阶段中小型土壤节肢动物多样性 杨大星,杨茂发,徐 进,等 (2531)

景观、区域和全球生态

- 极端干旱区大气边界层厚度时间演变及其与地表能量平衡的关系 张 杰,张 强,唐从国 (2545)

基于多源遥感数据的景观格局及预测研究..... 赵永华,贾 夏,刘建朝,等 (2556)

城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应.....

..... 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,等 (2565)

资源与产业生态

碳汇目标下农户森林经营最优决策及碳汇供给能力——基于浙江和江西两省调查.....

..... 朱 臻,沈月琴,吴伟光,等 (2577)

基于 GIS 的缓坡烟田土壤养分空间变异研究..... 刘国顺,常 栋,叶协锋,等 (2586)

春玉米最大叶面积指数的确定方法及其应用..... 麻雪艳,周广胜 (2596)

城乡与社会生态

广州市常见行道树种叶片表面形态与滞尘能力 刘 璐,管东生,陈永勤 (2604)

研究简报

桔梗种子萌发对低温、干旱及互作胁迫的响应..... 刘自刚,沈 冰,张 雁 (2615)

基质养分对寄生植物南方菟丝子生长的影响 张 静,李钧敏,闫 明 (2623)

学术信息与动态

人类活动对森林林冠的影响——第六届国际林冠学大会述评..... 宋 亮,刘文耀 (2632)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-04



封面图说: 互花米草近景——互花米草是多年生高大禾本科植物,植株健壮而挺拔,平均株高约 1.5m,最高可达 3.5m,茎秆直径可达 1cm 以上。原产于大西洋沿岸,是一种适应海滩潮间带生长的耐盐、耐淹植物。我国于 1979 年开始引入,原意主要是用于保滩护堤、促淤造陆和改良土壤等。但是,近年来,互花米草迅速扩散,在一些区域里,已经完全郁闭,形成了单优种群,严重排挤了本土物种的生长,并且还在以指数增长的速度逐年增加,对海岸湿地土著物种和迁徙鸟类造成的危害日益严重,已经列为必须严格控制的有害外来入侵物种。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201210181449

徐翠, 张林波, 杜加强, 郭杨, 吴志丰, 徐延达, 李芬, 王风玉. 三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响. 生态学报, 2013, 33(8): 2388-2399.
Xu C, Zhang L B, Du J Q, Guo Y, Wu Z F, Xu Y D, Li F, Wang F Y. Impact of alpine meadow degradation on soil water conservation in the source region of three rivers. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2388-2399.

三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响

徐 翠, 张林波*, 杜加强, 郭 杨, 吴志丰, 徐延达, 李 芬, 王风玉

(中国环境科学研究院/国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室/环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 三江源区是我国重要的水源涵养区, 研究草地退化对土壤水源涵养功能的影响, 可为三江源区水源涵养功能的科学评估与合理监测提供科学依据。以实地采样与室内测试分析相结合的方法研究了三江源区内不同土壤类型高寒草甸生物量特征、土壤水文物理性质及土壤水源涵养量。结果表明: 高寒草甸在重度退化阶段地上生物量、地下生物量、毛管孔隙度、总孔隙度、自然含水量、最大持水量、土壤水源涵养量显著低于未退化和中度退化阶段($P < 0.05$)。随着高寒草甸退化程度加剧, 土壤容重逐渐增大, 且非毛管孔隙度规律不显著。未退化、中度退化、重度退化草甸的土壤水源涵养量范围分别为 1884.32—1897.44 t/hm²、1360.04—1707.79 t/hm²、1082.38—1550.10 t/hm²。中度退化草甸土壤水源涵养量比未退化草甸低 9.37%—10.35%, 重度退化草甸低 18.31%—27.82%。草甸退化进程中土壤总孔隙度与毛管孔隙度的降低是影响土壤水源涵养量下降的直接原因, 而草甸退化进程中地上生物量与地下生物量的减少则是间接原因。度量三江源区高寒草甸土壤水源涵养功能时应着重考虑毛管孔隙度的蓄水作用。研究表明高寒草甸地上生物量与土壤水源涵养量之间存在显著的正相关关系($P < 0.05$), 该结果能够推动水源涵养功能评估向空间化、精细化发展, 为探索利用遥感技术监测三江源区水源涵养功能提供参考依据。

关键词: 三江源; 高寒草甸; 土壤容重; 孔隙度; 持水量; 土壤水源涵养量

Impact of alpine meadow degradation on soil water conservation in the source region of three rivers

XU Cui, ZHANG Linbo*, DU Jiaqiang, GUO Yang, WU Zhifeng, XU Yanda, LI Fen, WANG Fengyu

Chinese Research Academy of Environmental Sciences, State Environment Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Beijing 100012, China

Abstract: Research on the effects of grassland degradation on soil water conservation in the Sanjiangyuan region of China is essential as it can provide a scientific basis for evaluating and monitoring water conservation in this important water conservation area. Its regional strategic position is extremely important as 1.2% of the total water in the Yangtze River, 40% of the total water in the Yellow River, and 15% of the total water in the Lancang River comes from this area. As a result of climate change and human activity, grassland degradation had been more severe in the Sanjiangyuan region since the 1970s. Rangeland degradation not only impacts vegetation, it can also have great effects on soil physical and chemical properties. Changes to the physical and chemical properties of soil can subsequently affect the efficiency of soil water conservation. The vegetation in this region is dominated by grassland. In grassland ecosystems 99% of water conservation capacity comes from the capacity of soil to retain water. While soil water conservation efficiency is influenced by many factors such as vegetation type, land use and land cover, studies have shown that water yield in this region has decreased year by year and that water conservation capacity has declined sharply. These findings show that further studies exploring

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001055); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2012-YSKY-13); 中国环境保护部公益性行业科研专项(200909109)资助

收稿日期: 2012-10-18; 修订日期: 2013-03-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanglb@craes.org.cn

the impacts of grassland degradation on the function of soil water conservation are of great significance. Field surveys and experimental analyses were applied to detect vegetation biomass, soil moisture and physical characteristics, and soil water conservation capacity of alpine meadows in different soil types in this area. Results showed that above-ground biomass, under-ground biomass, capillary porosity, total porosity, natural water-holding capacity, maximum water holding capacity, and soil water conservation capacity decreased significantly at severely degraded alpine meadows ($P < 0.05$). When an alpine meadow deteriorated from not degraded alpine meadow status to moderately degraded and severely degraded alpine meadows, soil bulk density increased gradually. Soil non-capillary porosity, minimum water-holding capacity and capillary water-holding capacity did not change dramatically. The ranges of soil water conservation capacity at the three degradation stages were 1884.32—1897.44 t/hm², 1360.04—1707.79 t/hm² and 1082.38—1550.10 t/hm² respectively. Compared with not degraded alpine meadows with different soil types, soil water conservation capacity was reduced by 9.37%—10.35% at moderately degraded meadows, and by 18.31%—27.82% at severely degraded meadows. Reduced soil water conservation capacity was caused by diminished total porosity and capillary porosity and was also indirectly caused by a reduction of above-ground biomass and under-ground biomass associated with the degradation of the alpine meadows. The contribution of capillary porosity to water conservation should be taken into account when evaluating alpine meadow soil water conservation capacity in the Sanjiangyuan region. The results of the correlation analysis showed that soil water conservation capacity was positively correlated with above-ground biomass and under-ground biomass ($P < 0.05$). In addition to promoting the evaluation of water conservation function, our findings can be used to provide guidelines and methods for water conservation function monitoring in the Sanjiangyuan region by remote sensing.

Key Words: Sanjiangyuan; alpine meadow; soil bulk density; porosity; water holding capacity; soil water conservation capacity

三江源区生态战略地位极为重要,是我国重要的水源涵养生态功能调节区。长江总水量的 1.2%,黄河总水量的 40% 以及澜沧江总水量的 15% 均来自于三江源区^[1]。受气候变化和人类活动的共同影响,20 世纪 70 年代以前三江源区草地已经呈退化趋势^[2]。

高寒草地退化除造成植被状况^[3]发生明显变化外,还对土壤理化性质^[4]产生显著影响,使土壤肥力^[5]、土壤有机碳^[6-9]、土壤微生物^[10-12]与土壤酶活性^[13]等指标明显下降。土壤理化性质变化对水源涵养功能的发挥具有重要作用^[14]。刘敏超等^[15]以综合蓄水量方法计算得到三江源区水源涵养量总计为 1.6469×10^{10} t,其中,土壤蓄水量占总量的 99%。由此看出草地生态系统水源涵养功能以土壤蓄水为主。而不同的植被类型^[16]、生态系统类型^[17]以及土地利用与土地覆盖^[18]都会对土壤水源涵养功能产生不同程度的影响。近年来相关研究^[19]表明,三江源区水源涵养生态功能明显下降,源头产水量逐年减少。因此,研究三江源区生态系统状况变化与土壤水源涵养功能关系至关重要。

为了深入研究并探讨三江源区高寒草地退化对土壤水源涵养功能的影响,本文采用野外实地采样与室内测试分析的方法,针对三江源区分布面积最广的高寒草甸,在不同退化程度的高寒草甸生境内分别布设样地,采样并分析各退化阶段高寒草甸的生物量特征、土壤水文物理性质、土壤水源涵养量的变化趋势及其相关关系,研究高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响,为三江源区生态系统水源涵养精确评估与动态监测提供理论基础与科学依据。

1 研究区概况

三江源区隶属青藏高原腹地,位于东经 89°45′—102°23′,北纬 31°39′—36°12′,海拔在 3335—6564 m 之间,平均海拔为 4000 m。涉及青海省玉树、果洛、海南、黄南、海西 5 个藏族自治州的 16 个县以及格尔木市代管的唐古拉乡^[20],全区行政面积达 36.37 万 km²。为典型高原大陆性气候,全年冷热交替,干湿分明,年尺度与日尺度温差大,日照时间长,太阳辐射剧烈,植物生长周期短。全年平均气温为 -5.6—3.8℃,极端最低气

温低至 -48°C , 极端最高气温高达 28°C , 年平均降水量范围在 262.2 mm 到 772.8 mm 之间^[10]。高寒草甸、高寒草原和高山森林是三江源地区重要的植被类型^[11]。高寒草甸类草地常见优势种主要为莎草科嵩草属(*Kobresia* Wild.)、苔草属(*Carex* L.)以及禾本科披碱草属(*Elymus* L.)等植物^[21], 常见毒杂草有豆科棘豆属(*Oxytropis* DC.)、毛茛科乌头属(*Aconitum* L.)、菊科橐吾属(*Ligularia* Cass.)等^[22]。土壤类型多为高山草甸土、亚高山草甸土和高山草原土^[23], 其中, 高山草甸土为地带性土壤。

2 研究方法

2.1 样地布设与采样方法

参考青藏高原草地评价等级标准^[24]及 GB 19377—2003《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标》, 根据研究目的将三江源区高寒草甸退化阶段分为未退化、中度退化及重度退化 3 个阶段。为排除土壤类型差异对结果的影响, 需要对土壤类型进行划分。将全国 1:100 万土壤类型图、全国 1:100 万植被类型图与实际情况相结合, 根据土壤类型与植被类型的代表性, 确定样地植被类型以高寒草甸类为主, 土壤类型以亚高山草甸土、高山草甸土与高山草甸草原土为主, 综合考虑三江源区降水量、年积温、年均温等水热条件差异, 根据高寒草甸退化程度与土壤类型组合生境(共 9 种), 以空间分布代替时间演替的方法^[7, 25], 2012 年 8 月在三江源区黄南州、果洛州及玉树州境内布设样地。实地调查中在亚高山草甸土条件下仅选取到 1 个重度退化草甸, 高山草甸草原土条件下未选取到具代表性的未退化高寒草甸。因此, 共布设了 32 个样地, 样地大小为 30 m $\times$ 30 m, 每一样地均随机设置 3 个 1 m $\times$ 1 m 的植物样方。样地基本概况记录见表 1。

采用常规收获法^[26]采集地上生物量。三江源地区高寒草甸生境内约 95% 以上的根系主要集中在 0—20 cm^[4, 27], 利用根钻采集 0—20 cm 根系样品以测定地下生物量。在每个植物样地内挖取 3 个土壤剖面, 采用容积为 100 cm³ 的环刀采集 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 处原状土, 编号并称重、密封保存。

2.2 生物量及土壤特征测定

将采集的地上植被样品置于 65°C 下烘干至恒重, 称重得到地上生物量。用淘洗法将根系与土壤分离, 在 65°C 下烘干至恒重, 称重得到地下生物量。

参考《森林土壤定位研究方法》^[28]与 LY/T 1215-1999《森林土壤水分-物理性质的测定》由环刀法一次性连续检测并计算得到土壤容重、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度、自然含水量、毛管持水量、最小持水量、最大持水量等指标。

土壤最大蓄水量集中反映了土壤储存和调节水分的作用^[29], 本研究以土壤最大蓄水量将土壤水源涵养功能量化^[17, 30-33], 土壤水源涵养量由各层土壤最大持水量加和得到。

2.3 数据处理与分析方法

采用 SPSS 16.0 软件 One-Way ANOVA 统计各个指标平均值、标准差, 在 $P = 0.05$ 水平上 Least Significance Difference 法检验草甸地上生物量、地下生物量、各层土壤容重平均值、非毛管孔隙度平均值、毛管孔隙度平均值、总孔隙度平均值、0—30 cm 土壤自然含水量、毛管持水量、最小持水量及土壤水源涵养量在不同退化阶段间是否存在显著差异, 如存在显著差异, 则标记不同字母, 如无显著差异, 则标记同样字母。Bivariate Correlations 分析影响土壤水源涵养量的主要因素, 以 Pearson 相关性系数表征与每一指标间相关性高低, Two-tailed 检验反映与该指标间是否具有显著相关性。

3 结果与分析

3.1 高寒草甸退化对生物量的影响

从图 1 可以看出, 随着草甸退化程度的加重, 地上、地下生物量均呈降低趋势。与周华坤等^[4]研究结果一致。其中, 草甸退化对地上生物量的影响较为明显, 而对地下生物量的影响不明显, 可能地下生物量对草地退化的响应具有滞后现象, 需要更长的时间才能显现。

3.2 高寒草甸退化对土壤物理性质的影响

3.2.1 对土壤容重的影响

土壤容重在土壤剖面的垂直分布规律随草甸退化程度加剧发生变化。未退化、中度退化草甸土壤容重随

表 1 三江源区不同退化程度高寒草甸研究样地基本情况

Table 1 Plots profiles of alpine meadow at different degradation stages in Sanjiangyuan region							植被群落特征	
退化阶段	序号	采样地点	经度	纬度	海拔高度/m	土壤类型	植被覆盖度/%	Characteristic of vegetation community
Degradation stage	No.	Sampling location	Longitude(E)	Latitude(N)	Altitude	Soil type	Vegetation coverage	
未退化 Not degraded	1	黄南州泽库县	101°53.724'	34°53.065'	4061	亚高山草甸土	85.00±2.00	主要优势种为高山嵩草 (<i>Kobresia pygmaea</i>), 主要伴生种为圆穗蓼 (<i>Polygonum macrophyllum</i>)、珠芽蓼 (<i>Polygonum viviparum</i>)、火绒草 (<i>Leontopodium alpinum</i>)
	2	黄南州泽库县	101°39.164'	35°16.119'	3754	亚高山草甸土	96.67±1.53	
	3	黄南州泽库县	101°41.896'	35°06.533'	3708	亚高山草甸土	99.00±1.00	
	4	黄南州泽库县	101°48.835'	35°05.053'	3611	亚高山草甸土	92.67±2.08	
	5	玉树州杂多县	95°10.948'	32°58.178'	4745	高山草甸土	90.33±0.58	
	6	玉树州杂多县	95°10.949'	32°58.211'	4742	高山草甸土	85.00±0.00	
	7	果洛州玛沁县	100°23.849'	34°28.442'	4220	高山草甸土	90.00±1.73	主要优势种为矮生嵩草 (<i>Kobresia humilis</i>), 主要伴生种为圆穗蓼、风毛菊 (<i>Saussurea</i> sp.)
	8	玉树州称多县	97°11.122'	33°20.024'	4126	高山草甸土	96.00±1.00	
	9	果洛州玛沁县	100°08.536'	34°28.412'	3963	高山草甸土	90.33±1.53	
	10	果洛州玛沁县	100°08.256'	34°29.502'	3905	高山草甸土	98.33±0.58	
中度退化 Moderately degraded	11	玉树州杂多县	97°12.002'	33°20.432'	4143	亚高山草甸土	70.00±2.00	主要优势种为高山嵩草与矮生嵩草, 主要伴生种为风毛菊、圆穗蓼。群落中出现橐吾 (<i>Ligularia</i> Cass.)、棘豆 (<i>Oxytropis</i> DC.) 等毒杂草
	12	黄南州泽库县	101°27.860'	35°07.538'	3825	亚高山草甸土	63.00±11.53	
	13	黄南州泽库县	101°27.686'	35°07.938'	3796	亚高山草甸土	69.00±1.73	
	14	黄南州泽库县	101°27.448'	35°08.414'	3782	亚高山草甸土	63.00±5.29	
	15	果洛州玛沁县	95°10.949'	32°58.211'	4742	高山草甸	67.67±2.52	
	16	玉树州杂多县	95°11.707'	32°55.889'	4182	高山草甸	65.00±5.00	
	17	果洛州玛沁县	100°7.566'	34°21.365'	4150	高山草甸	63.33±7.64	
	18	果洛州玛沁县	100°07.472'	34°21.371'	4150	高山草甸	67.33±2.52	主要优势种为矮生嵩草与苔草, 主要伴生种为风毛菊、火绒草; 群落中出现棘豆、唐松草 (<i>Thalictrum alpinum</i>) 等毒杂草
	19	玉树州杂多县	96°27.755'	33°25.710'	4124	高山草甸	69.67±0.58	
	20	黄南州泽库县	101°53.724'	34°53.065'	4061	高山草甸	60.00±10.00	
重度退化 Severely degraded	21	黄南州泽库县	101°55.798'	34°54.045'	3923	高山草甸	64.00±3.61	主要优势种黑褐苔草 (<i>Carex atrofusca</i>), 伴生种为针茅 (<i>Stipa</i> L.)、矮火绒草 (<i>Leontopodium nanum</i>)
	22	黄南州泽库县	101°37.497'	35°17.236'	3836	高山草甸	70.33±8.96	
	23	果洛州玛多县	98°07.955'	34°45.360'	4342	高山草甸草原土	53.33±2.89	主要优势种为橐吾、细叶亚菊 (<i>Ajania tenuifolia</i>), 主要伴生种为萎陵菜 (<i>Potentilla</i> L.)
	24	果洛州玛多县	98°07.895'	34°48.177'	4292	高山草甸草原土	65.00±0.00	主要优势种为西伯利亚蓼 (<i>Polygonum sibiricum</i>)、亚菊等, 主要伴生种为藏麻 (<i>Potentilla anserina</i>) 和狗娃花 (<i>Heteropappus</i> Less.)
	25	果洛州玛多县	98°06.443'	37°43.646'	4277	高山草甸草原土	64.67±4.62	
	26	玉树州称多县	97°11.851'	33°20.439'	4143	亚高山草甸土	28.33±2.89	
	27	黄南州泽库县	101°25.291'	35°14.521'	3782	高山草甸	24.00±3.61	
	28	黄南州泽库县	101°26.206'	35°13.189'	3745	高山草甸	26.67±1.53	
	29	黄南州泽库县	101°09.613'	35°16.466'	3643	高山草甸	20.67±6.35	
	30	果洛州玛多县	98°07.407'	34°46.970'	4373	高山草甸草原土	30.00±5.00	主要优势种为矮火绒草, 主要伴生种为风毛菊
植被覆盖度为平均值±标准差	31	果洛州玛多县	98°07.603'	34°47.554'	4325	高山草甸草原土	15.67±1.15	
	32	果洛州玛多县	98°07.729'	34°47.665'	4320	高山草甸草原土	25.00±5.00	

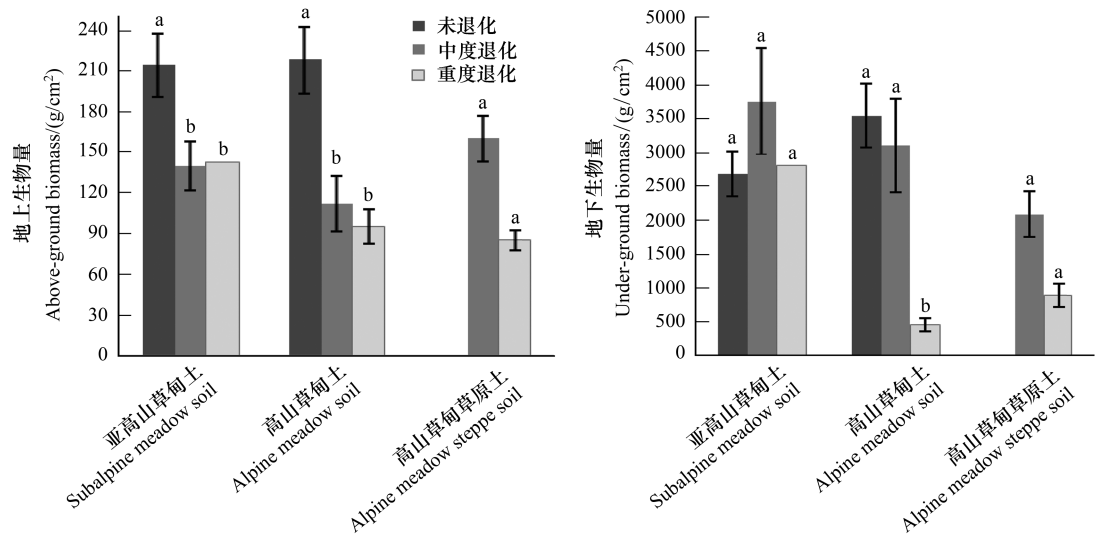


图1 三江源区不同退化阶段高寒草甸生物量

Fig. 1 Biomass of alpine meadow at different degradation stages in Sanjiangyuan Region

同一类土壤类型下不同字母代表不同退化阶段间数据差异显著(LSD 检验, $P<0.05$); 竖杠代表标准差

土壤深度增加逐渐增大,而在重度退化草甸中呈波动性变化(表2)。草甸由未退化向中度、重度退化阶段演替过程中,3层土壤容重平均值显著增大($P<0.05$,图2),这点与西藏当雄草地退化对土壤容重影响特点^[6]相吻合,也与魏强等^[34]在黄河上游玛曲的研究结果一致。

表2 高寒草甸不同退化阶段土壤物理性质特征

Table 2 Soil physical properties of alpine meadow at different degradation stages in different soil types						
土壤类型 Type of soil	退化阶段 Degradation stages	土壤深度 Depth of soil /cm	土壤容重 Soil bulk density /(g/cm ³)	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity /%	总孔隙度 Total porosity /%
亚高山草甸土 Subalpine meadow soil	未退化	0—10	0.69±0.03 ^① a	4.05±1.15a	64.38±2.95a	68.43±1.80a
		10—20	0.82±0.08a	2.91±0.50a	62.58±2.11a	65.48±2.19a
		20—30	0.99±0.08a	2.44±0.52a	53.40±6.55a	55.84±6.08a
	中度退化	0—10	0.77±0.06a	3.01±0.11a	59.89±1.74a	62.90±1.69b
		10—20	0.96±0.06a	2.58±0.09a	54.83±1.72b	57.41±1.76b
		20—30	1.16±0.05a	3.22±0.70a	46.57±1.08a	49.79±1.68a
	重度退化	0—10	1.12±0.00b	4.91±0.00a	47.52±0.00b	52.42±0.00c
		10—20	0.99±0.00b	5.58±0.00b	45.22±0.00c	50.80±0.00c
		20—30	1.17±0.00a	4.27±0.00a	47.53±0.00a	51.80±0.00a
高山草甸土 Alpine meadow soil	未退化	0—10	0.56±0.04a	3.26±0.78a	64.44±2.60a	67.71±2.06a
		10—20	0.80±0.04a	1.99±0.09a	61.08±1.75a	63.07±1.72a
		20—30	1.00±0.06a	2.35±0.34a	53.84±2.55a	56.18±2.38a
	中度退化	0—10	0.79±0.04b	3.79±0.70a	57.22±1.38b	61.00±1.09b
		10—20	0.96±0.02a	4.04±0.85b	51.50±0.90b	55.54±0.75b
		20—30	0.97±0.05b	3.61±0.92a	50.18±1.56ac	53.79±1.75a
	重度退化	0—10	1.28±0.01c	2.13±0.05a	43.04±1.07c	45.17±1.11c
		10—20	1.26±0.05b	1.92±0.33ac	43.69±0.89c	45.61±1.14c
		20—30	1.35±0.05c	2.00±0.18a	43.22±0.73bc	45.22±0.86ab
高山草甸草原土 Alpine meadow steppe soil	中度退化	0—10	1.17±0.04a	2.91±0.07a	45.90±0.89a	48.80±0.83a
		10—20	1.22±0.10a	3.69±0.21a	45.66±2.26a	49.34±2.22a
		20—30	1.23±0.00a	3.36±1.17a	42.32±2.16a	45.68±0.99a
	重度退化	0—10	1.57±0.03b	2.92±0.28a	35.07±0.74b	37.98±0.48b
		10—20	1.61±0.04b	2.58±0.39a	31.75±0.64b	34.33±0.49b
		20—30	1.52±0.07b	3.70±0.05a	32.85±0.33a	36.55±0.28a

①表示数据为平均值±标准误差;同一指标相同土壤条件下,同一土壤深度数据后的字母相同表明数据间差异不显著($P>0.05$)

3.2.2 对土壤孔隙度的影响

随着草甸由未退化向中度、重度退化进程中,土壤非毛细管孔隙度在土壤剖面上无明显的垂直变化规律(表2)。图2看出,土壤非毛细管孔隙度与草地退化程度无明显变化趋势,在亚高山草甸土条件下,重度退化阶段高寒草甸土壤非毛细管孔隙度显著高于其他退化阶段草甸($P<0.05$),与黄河上游玛曲高寒草地不同退化阶段的土壤非毛细管孔隙度^[34]结果一致,可能由于草地沙化或石砾化增大了土壤非毛细管孔隙度。而在高山草甸土条件下,中度退化阶段则显著高于其他退化阶段草甸($P<0.05$)。可能不同的土壤类型会使草地退化对土壤非毛细管孔隙度的影响加快或减慢。

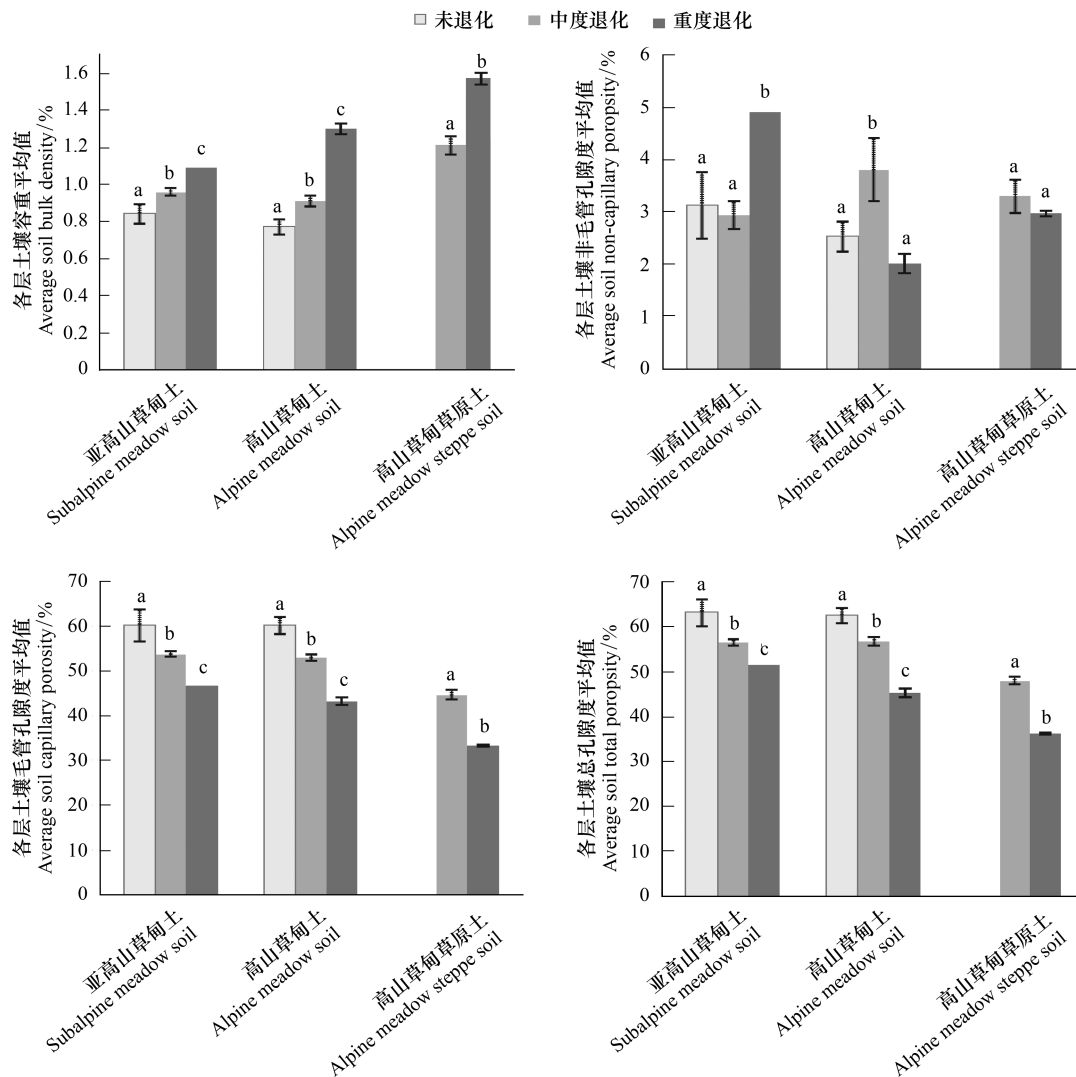


图2 不同退化阶段高寒草甸各层土壤容重、非毛细管孔隙度、毛细管孔隙度、总孔隙度平均值

Fig. 2 Average soil bulk density, non-capillary porosity, capillary porosity, total porosity in different degradation alpine meadow

表2可知,草甸退化影响了土壤毛细管孔隙度与总孔隙度在土壤剖面上的变化规律,当草甸处于未退化与中度退化阶段时,土壤毛细管孔隙度与总孔隙度在土壤剖面上逐渐减少,一旦草甸发生严重退化时,则发生波动性变化。由图2看出高寒草甸土壤毛细管孔隙度、总孔隙度由大到小排序:未退化草甸>中度退化草甸>重度退化草甸,规律与魏强等^[34]研究结果一致。

3.3 高寒草甸退化的土壤持水特征

由表3可知,草甸退化对土壤自然含水量在土壤剖面上的作用规律不明显。表3与图3共同说明高寒草甸由未退化向中度、重度退化过程演替过程中,0—10cm、10—20cm、20—30cm及0—30cm土壤自然含水量随

草甸退化程度加剧均呈降低趋势,西藏当雄草原草地退化对土壤自然含水量也存在这样的规律^[35]。

表 3 中可看出,草甸退化影响了土壤最大持水量在土壤剖面的垂直分布规律发生变化。高寒草甸在重度退化阶段,土壤最大持水量随在土壤剖面垂直方向呈波动性变化。

高寒草甸退化也影响了土壤最大持水量在土壤剖面的垂直分布规律(表 3),重度退化阶段土壤最大持水量随土壤深度出现波动变化。随着草甸退化程度加剧,高寒草甸 0—30cm 土壤毛管持水量呈降低趋势(图 3)。

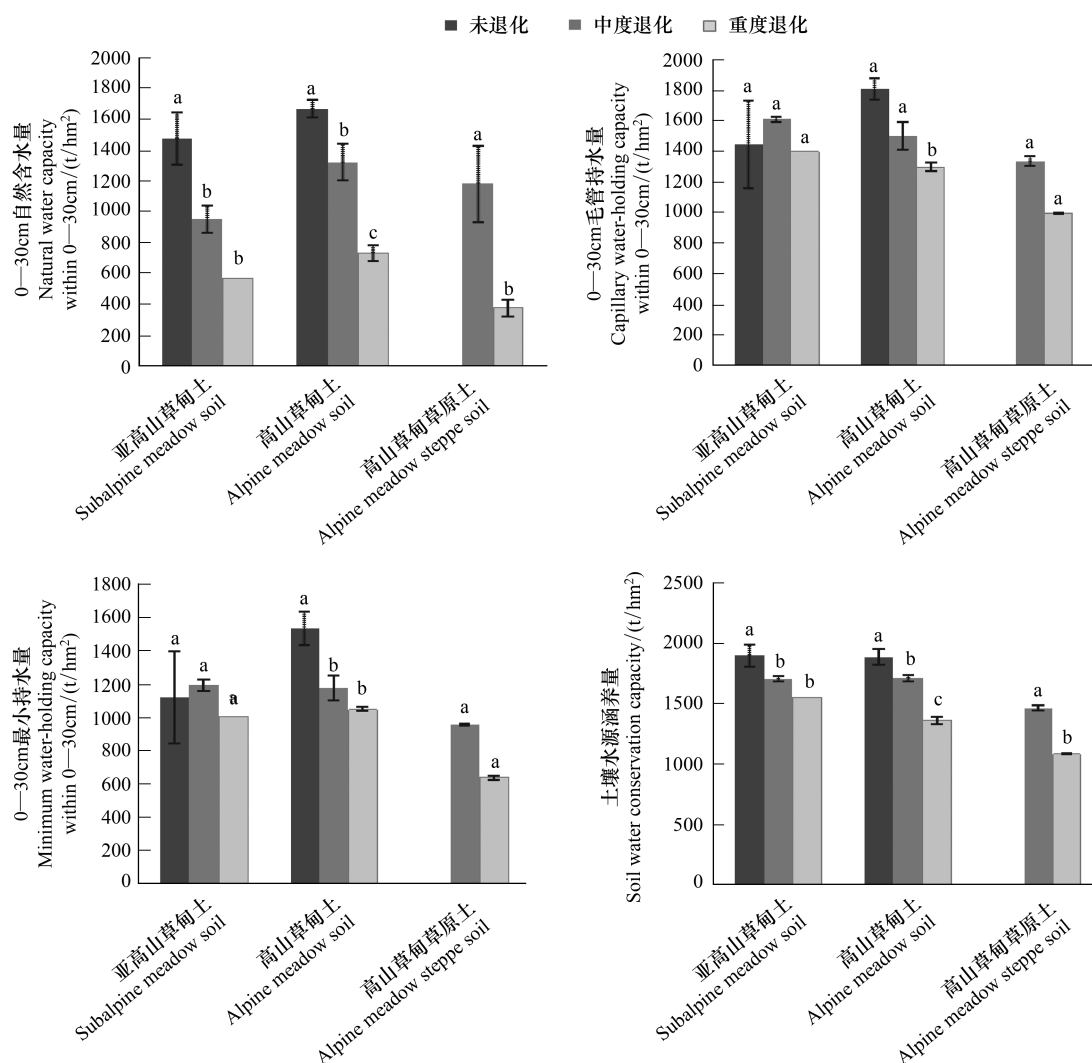


图 3 不同退化阶段高寒草甸 0—30cm 土壤自然含水量、毛管持水量、最小持水量及土壤水源涵养量

Fig. 3 Soil natural water water-holding capacity, capillary water-holding capacity, minimum water-holding capacity and soil water conservation capacity in different degradation alpine meadow

3.4 土壤水源涵养量变化趋势及其影响因素分析

从图 3 可看出,草甸退化过程中土壤水源涵养量呈显著降低趋势($P<0.05$)。在亚高山草甸土条件下,未退化、中度退化、重度退化阶段草甸土壤水源涵养量平均值分别为 1897.44、1701.04、1550.10t/hm²,分别降低了 10.35% 和 18.31%。在高山草甸土条件下,3 个退化阶段土壤水源涵养量平均值为 1884.32、1707.79、1360.04t/hm²,显著降低了 9.37% 和 27.82% ($P<0.05$)。在高山草甸草原土条件下,中度、重度退化草甸土壤水源涵养量平均值分别为 1462.10t/hm² 与 1082.38t/hm²,显著减少了 25.97% ($P<0.05$)。

表 3 不同土壤类型下高寒草甸不同退化阶段土壤水分特征

Table 3 Soil water characteristic of alpine meadow at different degradation stages in different soil types

土壤类型 Type of soil	退化阶段 Degradation stages	土壤深度 Depth of soil /cm	自然含水量 Natural water-holding capacity / (t/hm ²)	毛管持水量 Capillary water-holding capacity / (t/hm ²)	最小持水量 Minimum water-holding capacity / (t/hm ²)	最大持水量 Maximum water-holding capacity / (t/hm ²)
亚高山草甸土	未退化	0—10	520.47±41.31 ^① a	643.75±29.47a	473.51±44.26a	684.26±18.00a
		10—20	523.27±44.45a	426.37±131.65a	338.62±109.89a	654.82±21.89a
		20—30	434.11±108.29a	379.51±131.31a	307.83±126.10a	558.36±60.82a
	中度退化	0—10	343.27±39.42b	598.94±17.36a	408.77±20.66ac	629.02±16.91b
		10—20	331.10±28.95b	548.31±17.254a	433.52±15.75a	574.14±17.60b
		20—30	279.25±23.25a	465.66±10.81a	352.22±23.08a	497.87±16.79a
	重度退化	0—10	174.70±0.00c	475.15±0.00b	296.05±0.00bc	524.20±0.00c
		10—20	191.20±0.00c	452.15±0.00a	325.35±0.00a	507.95±0.00c
		20—30	206.45±0.00a	475.30±0.00a	382.60±0.00a	517.95±0.00a
高山草甸土	未退化	0—10	551.41±40.21a	646.20±26.81a	554.28±66.92a	677.07±20.61a
		10—20	556.54±44.08a	610.76±17.52a	503.78±27.85a	630.69±17.18a
		20—30	483.41±32.42a	538.35±25.51a	454.76±34.04a	561.81±23.83a
	中度退化	0—10	501.46±36.77a	572.18±13.83b	417.66±18.72b	610.03±10.87b
		10—20	406.74±40.16b	471.46±43.43b	383.53±33.89b	555.37±7.52b
		20—30	415.47±49.40a	458.72±41.56a	376.50±34.65a	542.39±15.95a
	重度退化	0—10	219.97±33.33b	430.38±10.65c	337.09±9.96b	451.70±11.14c
		10—20	240.01±7.55c	436.94±8.91b	358.67±3.03b	456.12±11.45c
		20—30	274.33±17.37a	432.21±7.25a	353.33±7.45a	452.22±8.60b
高山草甸草原土	中度退化	0—10	324.63±18.50a	458.97±8.95a	247.50±5.52a	488.03±8.25a
		10—20	298.38±28.70a	456.55±22.61a	360.22±19.79a	493.43±22.17a
		20—30	574.08±326.28a	423.20±21.60a	328.80±33.60a	456.80±9.90a
	重度退化	0—10	163.75±23.59b	350.65±7.35b	209.03±21.23a	379.80±4.85b
		10—20	170.68±47.29a	317.50±6.38a	224.08±4.88a	343.28±4.93b
		20—30	108.13±14.28b	328.48±3.33a	226.65±10.15a	365.50±2.80a

表 4 壤水源涵养量与主要影响因素相关性(双尾检验)

Table 4 Correlations between soil water conservation capacity and main factors that influence (2-tailed)

	地上生物量 Above-ground biomass	地下生物量 Under-ground biomass	平均土壤容重 Average soil bulk density	平均非毛管孔隙度 Average non-capillary porosity	平均毛管孔隙度 Average capillary porosity	土壤水源涵养量 Soil water conservation capacity
地上生物量 Above-ground biomass	1					
地下生物量 Under-ground biomass	0.243	1				
平均土壤容重 Average soil bulk density	-0.559 **	-0.542 **	1			
平均非毛管孔隙度 Average non-capillary porosity	0.010	-0.155	-0.050	1		
平均毛管孔隙度 Average capillary porosity	0.513 **	0.557 **	-0.951 **	-0.168	1	
土壤水源涵养量 Soil water conservation capacity	0.530 **	0.526 **	-0.974 **	-0.026	0.987 **	1

* * $P<0.01$

高寒草甸土壤水源涵养量与群落地上生物量、地下生物量、土壤容重、土壤总孔隙度以及土壤毛管孔隙度共 5 项指标间存在极显著的相关关系($P<0.01$,表 4),与土壤非毛管孔隙度关系不显著。在上述 5 项指标中,与草甸土壤水源涵养量存在正相关关系且相关性最高的指标为土壤总孔隙度,其次是土壤毛管孔隙度。从相关性检验结果中得到土壤水源涵养量与土壤容重呈现极显著的负相关关系($P<0.01$)。土壤水源涵养量与地

上生物量、地下生物量间也存在显著相关关系($P<0.05$),而地上生物量和地下生物量又分别与土壤容重、土壤毛管孔隙度呈显著相关($P<0.05$)。这是由于高寒草甸草地退化首先表现为植被退化,具体体现在植被覆盖度降低、毒杂草比例升高、地上生物量降低等方面。高寒草甸植被主要通过发达的根系直接参与土壤的发育过程^[4]。伴随草地退化的地上植被影响地下根系的数量,逐渐对土壤物理化学性质产生作用,继而造成土壤退化。而土壤退化则具体表现在土壤容重等物理指标发生变化,土壤贫瘠化等。土壤容重与孔隙度是土壤物理性质的重要参数,直接影响着土壤水源涵养量的高低^[33]。与表4结果一致,草地退化进程中的植被退化对土壤水源涵养功能具有间接影响作用,土壤退化则直接影响到土壤水源涵养功能。

4 讨论与结论

高寒草甸退化进程中,土壤水源涵养量平均值在未退化、中度退化和重度退化3个阶段分别为1890.15、1670.76t/hm²以及1361.90t/hm²,中度退化草甸较未退化草甸土壤水源涵养量低11.61%,重度退化草甸低27.95%。三江源区中度退化以上草地面积为 5.7×10^6 hm²,其中,重度退化草地面积为 1.8×10^6 hm²^[36],则中度退化草地面积为 3.9×10^6 hm²。可计算得到中度退化使草地土壤水源涵养量减少了 8.56×10^8 t,重度退化使草地土壤水源涵养量减少了 9.51×10^8 t,则土壤水源涵养量共减少了 18.07×10^8 t。因此在计算水源涵养量时充分考虑生态退化状况是准确评估的基础。本文仅以3种土壤条件下高寒草甸这一种植被类型进行研究,结果表明不同土壤类型、不同退化程度的水源涵养量存在差异。三江源区植被类型与土壤类型多样,在今后研究中,应重视土壤类型与植被类型的组合关系对土壤水源涵养量的影响。

随着草地退化加剧,高寒草甸地下生物量逐渐减少,土壤容重显著增大($P<0.05$),毛管孔隙度显著降低($P<0.05$),而非毛管孔隙度在草地退化阶段显著高于未退化阶段($P<0.05$)。同时,在三江源区高寒草甸退化过程中,土壤水源涵养功能显著减弱($P<0.05$),特别是在草甸从中度退化向重度退化演替过程中最为明显,降低幅度最大达27.82%。表明草地退化对土壤水源涵养功能具有显著的削弱作用($P<0.05$),与魏强等^[34]的结果趋势一致。这是因为植被退化逐渐引起土壤退化,根系浅层化减量化,土壤容重增大化^[4]。高寒草甸发达的根系会降低土壤下渗率,增大土壤毛管孔隙度,有利于土壤蓄水量的增加^[25],与本研究结果一致,表明未退化草甸土壤水源涵养量较高。而土壤非毛管孔隙度能够较快容纳降水,及时下渗,有利于调节河川径流,大多学者常以土壤非毛管孔隙度指标度量土壤水源涵养能力^[15, 37]。而草地生态系统中植被空间层次结果发育较差^[17],土壤结构与孔隙发育缓慢,土壤中大孔隙少而毛管孔隙发达,从而使得土壤本身的持水性能较强,土壤水源涵养功能的发挥受到土壤毛管孔隙度的限制。三江源区草地退化过程中,植被退化导致的土壤紧实度下降,土壤石砾含量升高^[38],增大了土壤非毛管孔隙度,但减少了总孔隙度,可能导致土壤水源涵养量降低。如果以土壤非毛管孔隙度计算水源涵养量则与实际情况不符。三江源区土壤总孔隙度95%以上由毛管孔隙度构成,与在玛曲实测结果^[34, 39]一致;相关性分析结果也表明土壤水源涵养量主要取决于土壤毛管孔隙度。因此,三江源区生态系统水源涵养的精确估算还有待进一步深入研究。

高寒草甸地上生物量在三江源区草地退化过程中呈显著降低趋势($P<0.05$),相关分析结果表明地上生物量与土壤水源涵养量间存在极显著的相关关系($P<0.01$),陈友君等^[40]在内蒙古大针茅草原也得到类似结论。现阶段,地上生物量的遥感反演技术已日渐成熟^[41-43],增加地上生物量影响土壤水源涵养量的机制及其相关关系研究对于建立地上生物量与土壤水源涵养量回归关系具有重要意义,其结果可为借助遥感反演地上生物量为区域水源涵养量的精确估算与功能实时动态监测提供依据。

致谢:青海省环境科学设计研究院翟永洪院长与李忠主任协助安排野外工作,青海省三江源区黄南州、果洛州、玉树州林业环保局、草原工作站相关工作人员参与了野外采样,在此一并致谢。

References:

- [1] Lv A F, Jia S F, Yan H Y, Yang G L. Temporal variations and trend analysis of the snowmelt runoff timing across the Source Regions of the Yangtze River, Yellow River and Lancang River. *Resources Science*, 2009, 17(10): 1704-1709.
- [2] Liu J Y, Xu X N, Shao Q Q. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the Three-River Headwaters Region in Qinghai

- Province. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(4): 364-376.
- [3] Wang C T, Long R J, Wang Q L, Jing Z C, Shi J J. Changes in plant diversity, biomass and soil C, in alpine meadows at different degradation stages in the headwater region of three rivers, China. *Land Degradation & Development*, 2009, 20(2): 187-198.
- [4] Zhou H K, Zhao X Q, Zhou L, Liu W, Li Y L, Tang H Y. A study on correlations between vegetation degradation and soil degradation in the "Alpine Meadow" of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Pratacultural Science*, 2005, 14(3): 31-40.
- [5] Cai X B, Zhang Y Q, Shao W. Characteristics of soil fertility in alpine steppes at different degradation grades. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1034-1044.
- [6] Cao L H, Liu H M, Zhao S W. Distribution of soil organic carbon and its relationship with soil physical and chemical properties on degraded alpine meadows. *Pratacultural Science*, 2011, 28(8): 1411-1415.
- [7] Wang C T, Long R J, Wang Q L, Jing Z C, Shi J J, Du Y G, Cao G M. Changes in soil organic carbon and microbial biomass carbon at different degradation successional stages of alpine meadows in the Headwater Region of Three Rivers in China. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2008, 14(2): 225-230.
- [8] Zhao J M, Gao C, Zhang D G. Study on the soil organic carbon density of alpine meadow with different degradation degrees in eastern Qilian Mountains. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(1): 21-25.
- [9] Wu R G, Tiessen H. Effect of land use on soil degradation in alpine grassland soil, China. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(5): 1648-1655.
- [10] Ren Z H, Zhang Y G, Li D Q, Xiao Q M, Cai C Y. The soil microbial activities and microbial biomass in Sanjiangyuan Alpine grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(11): 3232-3238.
- [11] Zhang Y G, Wang H M, Li D Q, Xiao Q M, Liu X D. The community and structure of nitrogen-fixing microorganism in Sanjiangyuan Natural Reserve. *Acta Microbiologica Sinica*, 2005, 45(3): 420-425.
- [12] Cai X B, Zhou J, Qian C. Variation of soil microbial activities in alpine steppes different in degradation intensity in the north Tibet Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(6): 1110-1118.
- [13] Li Y K, Han F, Ran F, Bao S K, Zhao H K. Effect of typical alpine meadow degradation on soil enzyme and soil nutrient in source region of three rivers. *Chinese Journal of Grassland*, 2008, 30(4): 51-58.
- [14] Xiong Y Q, Wu P F, Zhang H Z, Cui L W, He X J. Dynamics of soil water conservation during the degradation process of the Zoigê Alpine Wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5780-5788.
- [15] Liu M C, Li D Q, Wen Y R, Luan X F. Function and value of water-holding in Sanjiangyuan Region. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(3): 405-408.
- [16] Mo F, Li X Y, He S X, Wang X X. Evaluation of soil and water conservation capacity of different forest types in Dongling Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(17): 5009-5016.
- [17] Pan C X, Li Y Y, Peng Y, Gao R, Wu J S. Soil water holding capacity under four typical ecosystems in Wuyunjie Nature Reserve of Hunan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(2): 538-547.
- [18] Zhang Y D, Liu S R, Luo C W, Zhang G B, Ma J M. Water holding capacity of ground covers and soils in different land uses and land covers in subalpine region of Western Sichuan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 627-635.
- [19] Liu J Y, Shao Q Q, Fan J W. The integrated assessment indicator system of grassland ecosystem in the Three-River Headwaters region. *Geographical Research*, 2009, 28(2): 273-283.
- [20] Chen G C. *Ecological Protection and Construction of Sanjiangyuan Natural Protection Area*. Xi'ning: Qinghai People's Publishing House, 2007: 1-2.
- [21] Wang L Y, Kang H J. *Grassland Resources and the Dominated Plants Atlas of Sanjiangyuan Region*. Xi'ning: Qinghai People's Publishing House, 2011: 28-40.
- [22] Hou X Y, Sun H Q. *Dominated Grassland Types and Common Plants Atlas of Qinghai Province*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2012: 89-456.
- [23] Shao J A, Shao Q Q, Liu J Y. Soil property and its formation of ecosystems in three river sources, Qinghai. *Geographical Research*, 2009, 28(3): 613-624.
- [24] Zheng D, Yao T D. *Uplifting of Tibetan Plateau with Its Environmental Effects*. Beijing: Science Press, 2004: 544-545.
- [25] Zeng C, Zhang F, Yan X. Effects of mastic epipedon on surface soil hydraulic properties of alpine meadow soil//EGU General Assembly 2012. Austria: Smithsonian Astrophysical Observatory, 2012:653.
- [26] Li Y Y, Dong S K, Li X Y, Wen L. Effect of enclosure on vegetation photosynthesis and biomass of degraded grasslands in headwater area of Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(4): 621-625.

- [27] Wang C T, Wang G X, Liu W, Wang Q L, Xiang Z Y. Vegetation roots and soil physical and chemical characteristics in degeneration succession of the *Kobresia pygmaea* meadow. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(3): 409-416.
- [28] Zhang W R, Xu B T. *Forest Soil Localization Research Methods*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1986: 30-34.
- [29] Wang G S, Hong X Y, Wang L X. Water regulation effect of *Pinus tabulae formis* and other forest stands in the upper part of Miyun reservoir in Beijing. *Journal of Beijing Forestry University*, 1995, 17(2): 21-26.
- [30] Chen X W, Wang W B, Xia X Y. Optimal disposition of water conservation forests in watershed. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2): 267-271.
- [31] Peng M J, Lang N J, Wen S L, Guo Y Q, Jiang Q C, Yang X, Zheng K, Guo Y H, Zhang L X. Soil properties and water conservation function of different forest types in Jinshajiang River Watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6): 106-109.
- [32] Zhu Z F, Gong G T, Chen J H, Mu C L. Study on optimum forest coverage for water conservation: a case study in Pingtonghe watershed (Pingwu section). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1662-1668.
- [33] Sun Y H, Zhang H J, Cheng J H, Wang Y J, Shi J, Cheng Y. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Jinyun Mountain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 106-109.
- [34] Wei Q, Wang F, Chen W Y, Zhu L, Zhu G Y, Qi D C. Soil physical characteristics on different degraded alpine grasslands in Maqu County in Upper Yellow River. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(5): 16-21.
- [35] Cao L H, Liu H M, Zhao S W. The distribution of soil water contents and bulk density on degraded grassland at Dangxiong. *Acta Agretrir Sinica*, 2011, 19(5): 746-751.
- [36] Wang B, Li H, Jiang W W, Zhao L, Gu S. Impacts of the rangeland degradation on CO₂ flux and the underlying mechanisms in the Three-River Source Region on the Qinghai-Tibetan Plateau. *China Environmental Science*, 2012, 32(10): 1764-1771.
- [37] Si J, Han P, Zhao C L. Review of water conservation value evaluation methods of forest and case study. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(12): 2100-2109.
- [38] Wang G X, Cheng G, Shen Y, Qian J. Influence of land cover changes on the physical and chemical properties of alpine meadow soil. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(2): 118-124.
- [39] Yi X S, Li G S, Yin Y Y. The impacts of grassland vegetation degradation on soil hydrological and ecological effects in the source region of the Yellow River — A case study in Junmuchang region of Maqin country. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 967-981.
- [40] Chen Y J, Li L S, Li L M, Jia S H. Analysis on the correl ationship between soil water capacity and annual highest biomass of *stipa grandis* grassland. *Grassland of China*, 1994, (1): 29-34.
- [41] Liang T G, Cui X, Feng Q S, Wang Y, Xia W T. Remotely sensed dynamics monitoring of grassland aboveground biomass and carrying capacity during 2001—2008 in Gannan pastoral area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(6): 12-22.
- [42] Chen P F, Wang J L, Liao X Y, Yin F, Chen B R, Liu R. Using data of HJ-1A/B satellite for hulunbeier grassland aboveground biomass estimation. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(7): 1122-1131.
- [43] Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, Gower S T, Running S W, Zhao M S, Costa M H, Kirschbaum A A, Ham J M, Saleska S R, Ahl D E. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(3/4): 282-292.

参考文献:

- [1] 吕爱锋, 贾绍凤, 燕华云, 杨贵林. 三江源地区融雪径流时间变化特征与趋势分析. *资源科学*, 2009, 17(10): 1704-1709.
- [2] 刘纪远, 徐新良, 邵全琴. 近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征. *地理学报*, 2008, 63(4): 364-376.
- [4] 周华坤, 赵新全, 周立, 刘伟, 李英年, 唐艳鸿. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究. *草业学报*, 2005, 14(3): 31-40.
- [5] 蔡晓布, 张永青, 邵伟. 不同退化程度高寒草原土壤肥力变化特征. *生态学报*, 2008, 28(3): 1034-1044.
- [6] 曹丽花, 刘合满, 赵世伟. 退化高寒草甸土壤有机碳分布特征及与土壤理化性质的关系. *草业科学*, 2011, 28(8): 1411-1415.
- [7] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 景增春, 施建军, 杜岩功, 曹广民. 三江源区高寒草甸不同退化演替阶段土壤有机碳和微生物量碳的变化. *应用与环境生物学报*, 2008, 14(2): 225-230.
- [8] 赵锦梅, 高超, 张德罡. 祁连山东段不同退化高寒草甸土壤有机碳密度研究. *草地学报*, 2010, 18(1): 21-25.
- [10] 任佐华, 张于光, 李迪强, 肖启明, 蔡重阳. 三江源地区高寒草原土壤微生物活性和微生物量. *生态学报*, 2011, 31(11): 3232-3238.
- [11] 张于光, 王慧敏, 李迪强, 肖启明, 刘学端. 三江源地区不同植被土壤固氮微生物的群落结构研究. *微生物学报*, 2005, 45(3): 420-425.
- [12] 蔡晓布, 周进, 钱成. 不同退化程度高寒草原土壤微生物活性变化特征研究. *土壤学报*, 2008, 45(6): 1110-1118.
- [13] 李以康, 韩发, 冉飞, 包苏科, 周华坤. 三江源区高寒草甸退化对土壤养分和土壤酶活性影响的研究. *中国草地学报*, 2008, 30(4): 51-58.

- [14] 熊远清, 吴鹏飞, 张洪芝, 崔丽巍, 何先进. 若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能. 生态学报, 2011, 31(19): 5780-5788.
- [15] 刘敏超, 李迪强, 温琰茂, 栾晓峰. 三江源地区生态系统水源涵养功能分析及其价值评估. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 405-408.
- [16] 莫非, 李叙勇, 贺淑霞, 王晓学. 东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价. 生态学报, 2011, 31(17): 5009-5016.
- [17] 潘春翔, 李裕元, 彭亿, 高茹, 吴金水. 湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能. 生态学报, 2012, 32(2): 538-547.
- [18] 张远东, 刘世荣, 罗传文, 张国斌, 马姜明. 川西亚高山林区不同土地利用与土地覆盖的地被物及土壤持水特征. 生态学报, 2009, 29(2): 627-635.
- [19] 刘纪远, 邵全琴, 樊江文. 三江源区草地生态系统综合评估指标体系. 地理研究, 2009, 28(2): 273-283.
- [20] 陈桂琛. 三江源自然保护区生态保护与建设. 西宁: 青海人民出版社, 2007: 1-2.
- [21] 王立亚, 康海军. 三江源区草地资源及主要植物图谱. 西宁: 青海人民出版社, 2011: 28-40.
- [22] 侯向阳, 孙海群. 青海主要草地类型及常见植物图谱. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2012: 89-456.
- [23] 邵景安, 邵全琴, 刘纪远. 三江源地区各类生态系统土壤的性状及其形成能力. 地理研究, 2009, 28(3): 613-624.
- [24] 郑度, 姚檀栋. 青藏高原隆升与环境效应. 北京: 科学出版社, 2004: 544-545.
- [26] 李媛媛, 董世魁, 李小艳, 温璐. 围栏封育对三江源区退化高寒草地植物光合作用及生物量的影响. 草地学报, 2012, 20(4): 621-625.
- [27] 王长庭, 王根绪, 刘伟, 王启兰, 向泽宇. 植被根系及其土壤理化特征在高寒小嵩草草甸退化演替过程中的变化. 生态环境学报, 2012, 21(3): 409-416.
- [28] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法. 北京: 中国林业出版社, 1986: 30-34.
- [29] 王国胜, 洪惜英, 王礼先. 密云水库上游油松等林分调节水分效应的研究. 北京林业大学学报, 1995, 17(2): 21-26.
- [30] 陈祥伟, 王文波, 夏祥友. 小流域水源涵养林优化配置. 应用生态学报, 2007, 18(2): 267-271.
- [31] 彭明俊, 郎南军, 温绍龙, 郭永清, 江期川, 杨旭, 郑科, 郭玉红, 张立新. 金沙江流域不同林分类型的土壤特性及其水源涵养功能研究. 水土保持学报, 2005, 19(6): 106-109.
- [32] 朱志芳, 龚固堂, 陈俊华, 慕长龙. 基于水源涵养的流域适宜森林覆盖率研究——以平通河流域(平武段)为例. 生态学报, 2011, 31(6): 1662-1668.
- [33] 孙艳红, 张洪江, 程金花, 王玉杰, 石健, 程云. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能. 水土保持学报, 2006, 20(2): 106-109.
- [34] 魏强, 王芳, 陈文业, 朱丽, 李广宇, 戚登臣. 黄河上游玛曲不同退化程度高寒草地土壤物理特性研究. 水土保持通报, 2010, 30(5): 16-21.
- [35] 曹丽花, 刘合满, 赵世伟. 当雄草原不同退化草甸土壤含水量及容重分布特征. 草地学报, 2011, 19(5): 746-751.
- [36] 王斌, 李洁, 姜微微, 赵亮, 古松. 草地退化对三江源区高寒草甸生态系统 CO₂ 通量的影响及其原因. 中国环境科学, 2012, 32(10): 1764-1771.
- [37] 司今, 韩鹏, 赵春龙. 森林水源涵养价值核算方法评述与实例研究. 自然资源学报, 2011, 26(12): 2100-2109.
- [40] 陈有君, 李绍良, 李立民, 贾树海. 大针茅草原地上最高生物量与土壤贮水量的相关分析. 中国草地, 1994, (1): 29-34.
- [41] 梁天刚, 崔霞, 冯琦胜, 王莺, 夏文韬. 2001—2008 年甘南牧区草地上生物量与载畜量遥感动态监测. 草业学报, 2009, 18(6): 12-22.
- [42] 陈鹏飞, 王卷乐, 廖秀英, 尹芳, 陈宝瑞, 刘睿. 基于环境减灾卫星遥感数据的呼伦贝尔草地地上生物量反演研究. 自然资源学报, 2010, 25(7): 1122-1131.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 8 April, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Special Topics in Urban Ecosystems

- Guidelines and evaluation indicators of urban ecological landscape construction SUN Ranhao, CHEN Ailian, LI Fen, et al (2322)
- Research progress in the quantitative methods of urban green space patterns TAO Yu, LI Feng, WANG Rusong, et al (2330)
- Effects of land use change on ecosystem service value: a case study in Huaibei City, China ZHAO Dan, LI Feng, WANG Rusong (2343)
- Urban ecosystem complexity: an analysis based on urban municipal supervision and management information system DONG Rencai, GOU Yaqing, LIU Xin (2350)
- A case study of the effects of *in-situ* bioremediation on the release of pollutants from contaminated sediments in a typical, polluted urban river LIU Min, WANG Rusong, JIANG Ying, et al (2358)
- The pollution characteristics of Beijing urban road sediments REN Yufen, WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, et al (2365)
- Effects of urban green pattern on urban surface thermal environment CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding (2372)
- Seasonal dynamics of airborne pollen in Beijing Urban Area MENG Ling, WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, et al (2381)

Autecology & Fundamentals

- Impact of alpine meadow degradation on soil water conservation in the source region of three rivers XU Cui, ZHANG Linbo, DU Jiaqiang, et al (2388)
- Predicting the plant exposure to soil arsenic under varying soil factors XIAN Yu, WANG Meie, CHEN Weiping (2400)
- Attraction effect of different host-plant to Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata* LI Chao, CHENG Dengfa, GUO Wenchao, et al (2410)
- Root decomposition and nutrient dynamics of *Quercus mongolica* and *Betula Platyphylla* JIN Beibei, GUO Qingxi (2416)
- The interaction of drought and slope aspect on growth of *Quercus variabilis* and *Platycladus orientalis* WANG Lin, FENG Jinxia, WANG Shuangxia, et al (2425)
- Effects of diameter at breast height on crown characteristics of Chinese Fir under different canopy density conditions FU Liyong, SUN Hua, ZHANG Huiru, et al (2434)
- Effects of temperature acclimation and acute thermal change on cutaneous respiration in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*) XIAN Xuemei, CAO Zhendong, FU Shijian (2444)

Population, Community and Ecosystem

- Altitudinal pattern of plant species diversity in the Wulu Mountain Nature Reserve, Shanxi, China HE Yanhua, YAN Ming, ZHANG Qindi, et al (2452)
- Vegetation succession on Baishui No. 1 glacier foreland, Mt. Yulong CHANG Li, HE Yuanqing, YANG Taibao, et al (2463)
- The effects of *Spartina alterniflora* seaward invasion on soil organic carbon fractions, sources and distribution WANG Gang, YANG Wenbin, WANG Guoxiang, et al (2474)
- Community characteristics and soil properties of coniferous plantation forest monocultures in the early stages after close-to-nature transformation management in southern subtropical China HE Youjun, LIANG Xingyun, QIN Lin, et al (2484)
- Response of invasive plant *Flaveria bidentis* to simulated herbivory based on the growth and reproduction WANG Nannan, HUANGFU Chaohe, LI Yujin, et al (2496)
- Estimation of leaf area index of secondary *Betula platyphylla* forest in Xiaoxing'an Mountains LIU Zhili, JIN Guangze (2505)
- Optimal number of herb vegetation clusters: a case study on Yellow River Delta YUAN Xiu, MA Keming, WANG De (2514)
- Application of polychaete in ecological environment evaluation of Laizhou Bay ZHANG Ying, LI Shaowen, LÜ Zhenbo, et al (2522)
- Soil meso- and micro arthropod community diversity in the burned areas of *Pinus massoniana* plantation at different restoration stages YANG Daxing, YANG Maofa, XU Jin, et al (2531)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Temporal variety of boundary layer height over deep arid region and the relations with energy balance ZHANG Jie, ZHANG Qiang, TANG Congguo (2545)
- Analysis and forecast of landscape pattern in Xi'an from 2000 to 2011 ZHAO Yonghua, JIA Xia, LIU Jianchao, et al (2556)
- Spatio-temporal variation in the value of ecosystem services and its response to land use intensity in an urbanized watershed HU Hebing, LIU Hongyu, HAO Jingfeng, et al (2565)

Resource and Industrial Ecology

- Household optimal forest management decision and carbon supply: case from Zhejiang and Jiangxi Provinces ZHU Zhen, SHEN Yueqin, WU Weiguang, et al (2577)
- Spatial variability characteristics of soil nutrients in tobacco fields of gentle slope based on GIS LIU Guoshun, CHANG Dong, YE Xiefeng, et al (2586)
- Method of determining the maximum leaf area index of spring maize and its application MA Xueyan, ZHOU Guangsheng (2596)

Urban, Rural and Social Ecology

- Morphological structure of leaves and dust-retaining capability of common street trees in Guangzhou Municipality LIU Lu, GUAN Dongsheng, CHEN Yongqin David (2604)

Research Notes

- Morphological responses to temperature, drought stress and their interaction during seed germination of *Platycodon grandiflorum* LIU Zigang, SHEN Bing, ZHANG Yan (2615)
- Effects of nutrients on the growth of the parasitic plant *Cuscuta australis* R. Br. ZHANG Jing, LI Junmin, YAN Ming (2623)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 吕永龙

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 33 卷 第 8 期 (2013 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 8 (April, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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 90.00 元