

不同退化演替阶段高寒草甸表层土壤持水特性的初步研究

范月君^{1,2} 侯向阳¹ 赵得萍³ 石红霄¹ 周华坤³ 李欣⁴

(1. 中国农业科学院草原研究所, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 青海畜牧兽医职业技术学院, 青海 湟源 812100; 3. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海省寒区恢复生态学重点实验室, 青海 西宁 810008; 4. 青海大学, 青海 西宁 810016)

摘要:以三江源区高寒草甸为研究对象,利用空间分布代替时间演替的方法,选取轻度退化(Lightly degraded grassland, LG)、中度退化(Moderately degraded grassland, MG)和重度退化(Heavily degraded grassland, HG)高山嵩草草甸(*Kobresia pygmaea* meadow)样地,研究了不同退化演替阶段土壤持水能力和渗透性。结果表明,土壤总空隙度、非毛管孔隙度、毛管孔隙度呈现下降趋势,最低值出现在HG阶段,分别为42.03%、11.76%和30.27%;随着高寒草甸退化加剧,HG测定土层土壤总库容、土壤滞留库容、土壤吸持库容均呈现下降趋势,水分入渗速率变化范围从29.99 mm·min⁻¹减少到了3.48 mm·min⁻¹,说明重度退化阶段土壤水分入渗速率极强,而土壤的保水能力却最弱;相关分析表明,土壤持水量指标与土壤容重呈极显著负相关($P < 0.01$)和入渗速率显著负相关($P < 0.05$),与孔隙度成显著正相关关系($P < 0.05$),土壤容重和孔隙度显著负相关($P < 0.05$),说明严重退化草地因过度放牧,土壤压实程度较大,从而导致孔隙度较小,进而影响草地持水能力。在自然状况下,轻度退化草甸0~8 cm土壤最大持水量最高为512.16 t/hm²,重度退化0~8 cm土壤最大持水量最低为336.24 t/hm²,按照重度退化草甸 1.8×10^6 hm²粗略估计,三江源重度退化高寒草甸使草地土壤上层水源涵养量减少了 3.16×10^8 t。

关键词:土壤水库;土壤持水能力;入渗速率;退化演替;高寒草甸

中图分类号:S812

文献标志码:A

文章编号:2095-4271(2019)01-0010-06

Preliminary study on soil water-holding capacity along degradation gradients of alpine meadow

FAN Yue-jun^{1,2} HOU Xiang-yang¹ ZHAO De-ping³ SHI Hong-xiao¹ ZHOU Hua-kun³ LI Xin⁴

(1. Grassland Research Institute of Chinese Academy of Agriculture Science, Hohhot 010010, P. R. C.; 2. Qinghai Vocational and Technical College of Animal Husbandry and Veterinary Science, Huangyuan 812100, P. R. C.; 3. Northwest Institute of Plateau, Chinese Academy of Science, Key Laboratory of Restoration Ecology of Cold Area in Qinghai Province, Xining 810008, P. R. C.; 4. Qinghai University, Xining 810016, P. R. C.)

Abstract: *Kobresia pygmaea* meadow in the three headwaters was selected as the research target in the study, which was divided into four degradation successional stages based on spatial distribution in stead of temporal succession including lightly degraded grassland(LG), moderately degraded grassland(MD) and heavily degraded grassland(HD). An analysis was carried out on soil water-holding capacity and soil infiltration property. The results showed that the soil total porosity, non-capillary porosity, capillary porosity presented single-peak curve, and the lowest in HG phase of 42.03%, 11.76% and 30.24%, respectively; With in-

收稿日期:2018-12-02

作者简介:范月君(1979-),男,汉族,青海海东人,教授,博士(后),研究方向:高寒草地生态、资源与环境, fanyuejun_79@163.com
通信作者:侯向阳(1963-),男,山西浑源人,研究员,博士,博士生导师,研究方向:草地生态适应性管理, E-mail: houxy16@126.com; 赵得萍, dpzhao@nwipb.cas.cn

基金项目:中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-IGR2015-05);青海省应用基础研究项目(2016-ZJ-726);青海省创新平台建设专项(2017-ZJ-Y20)

tensified soil total capacity, retention capacity, holding storage capacity all showed declining trend. Compared with no degradation, HG phase to LG, water infiltration rate ranged from $29.99 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ to $3.48 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, whose soil water infiltration rate of severe degradation stage was extremely strong, and soil water retention was the weakest; Correlation analysis showed that soil water capacity index were very significantly negatively correlated with the soil bulk density ($P < 0.01$) and the infiltration rate showed significantly negative correlation ($P < 0.05$) and the porosity significant positive correlation ($P < 0.05$), soil bulk density and porosity significantly negative correlation ($P < 0.05$) because seriously degraded grassland overgrazing, soil compaction degree is larger resulted in less porosity, in turn water-holding ability affects the grass. Under natural conditions, LD meadow 0 ~ 8 cm soil maximum moisture capacity was up to 512.16 t/hm^2 . Meanwhile HG meadow of 0 ~ 8 cm soil maximum moisture capacity was 336.24 t/hm^2 . In accordance with the severely degraded meadow $1.8 \times 10^6 \text{ hm}^2$ roughly to estimate, three severely degraded alpine meadow makes grassland soil upper water conservation to reduce the amount of $3.16 \times 10^8 \text{ t}$.

Key words: soil reservoir; soil moisture retention capacity; infiltration rate; degradation succession; alpine meadow

土壤水作为四水(地表水、地下水、大气水、土壤水)转化的重要纽带,参与水资源的形成、转化与消耗主要过程^[1],是土壤水物理学研究的一个重要内容,其本身受到植被总盖度、生态环境等诸多因子和土地利用方式等外界活动的影响^[2].放牧是草地基本的社会属性,研究表明,合理利用草地可以优化草地土壤结构,不合理利用可能降低土壤质量,从而引起土壤系统及生态系统退化^[3],使得草地土壤蓄水和持水能力下降.因此研究不同退化演替阶段草地土壤水分和水源涵养能力已成为国内外生态水文的热点问题.

本研究区位于三江源区,自上世纪 80 年代以来,在自然和人类活动的双重干扰下,草地生态系统退化演替加剧,鼠虫害频发,水土保持和水源涵养能力下降,生态系统服务功能减退和自身修复能力减弱^[4].为此,本研究对三江源区不同退化演替阶段下土壤持水能力和渗透性及土壤水库特征进行研究分析,以期三江源区高寒脆弱生态系统的土壤水源涵养和功能的修复提高提供科学基础数据.

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

试验区位于青海省玉树州称多县珍秦镇的“农业部玉树高寒草原资源与生态环境重点野外科学观测站”($33^{\circ}24'30''\text{N}$, $97^{\circ}18'00''\text{E}$),海拔高度 4 250 m.具体试验地情况见石红霄等文献[5].

1.2 样地设计

采用草地退化标准^[6-7]利用空间分布代替时间演替^[8]研究不同退化高寒草甸土壤的持水特征变化,以

各样地盖度、生物量、土壤紧实度及优良牧草所占比例等作为划分高寒草甸退化演替阶段的主要参考标准,并选择不同退化演替阶段的高寒草甸样地,依次为轻度退化(Lightly degraded grassland, LG)、中度退化(Moderately degraded grassland, MG)和重度退化草地(Heavily degraded grassland, HG)(见表 1).

1.3 土壤水分物理性质的测定与计算

采用环刀法一次性连续测定土壤容重、孔隙度、持水特征等^[9].第一步,在水中浸泡 12 h 装满原状土的环刀后称重,计算最大持水量;后将称重环刀放置在装满石英砂的环刀上 2 h,待土壤的非毛管水分全部流出,称重,计算毛管持水量;称重后,将环刀继续放置 24 h,称重,此时土壤水分为毛管悬着水,计算最小持水量;最后,将环刀土放置于烘箱中 105°C 下烘干 24 h 至恒重,称取环刀中的干土质量.最后根据测定数据,完成土壤容重(ρ , $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$),非毛管孔隙度(P_{ac} , %),毛管孔隙度(P_c , %)等指标,将各持水量的单位 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 均换算为 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$.

土壤贮水量的计算公式如下:

$$W_c = 10000P_c hr, W_{ac} = 10000P_{ac} hr, W_i = W_c + W_{ac}, \rho = W_i / V_0, P = 1 - \rho / D$$

式中: W_c 为土壤吸持库容, W_{ac} 为土壤滞留库容, W_i 为土壤总库容, W 土壤实际贮水量, r 为水的比重 ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$), ρ 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), W_i 为干土重 (g), V_0 为环刀体积 (cm^3), D 为土壤密度,一般为 $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.其中土壤含水量的测定用烘干法.

表 1 研究区域位置和植被
Table 1 Geographical and plant characteristics of *K. pygmaea* meadow

内容 Items	轻度退化 (LG)	中度退化 (MG)	重度退化 (HG)
方位 Location	33°24'27.4" N 97°20'57.6" E	33°24'22.7" N 97°21'16.9" E	33°24'17.2" N 97°21'04.5" E
海拔 Altitude(m)	4212.3	4286.2	4287.2
主要植物种 Main plantspecies	高山嵩草(<i>K. pygmaea</i>), 异针茅(<i>S. aliena</i>), 早熟禾(<i>P. crymophila</i>), 矮蒿草(<i>K. kansuensis</i>)	高山嵩草(<i>K. pygmaea</i>), 异针茅(<i>S. aliena</i>), 萎陵菜 <i>P. saundersiana</i>)	高山嵩草(<i>K. pygmaea</i>), 异针茅(<i>S. aliena</i>), 风毛菊 <i>S. superba</i>), 微孔草(<i>Microula tibetica</i>)
土壤类型 Soil Type	AMS	AMS	AMS
地上生物量 Proportion of aboveground biomass(%)	70 ~ 85	50 ~ 69.9	< 50
盖度 Coverage(%)	70 ~ 85	50 ~ 69.9	< 50
优良牧草比例 Proportion of palatable herbage(%)	50 ~ 70	30 ~ 49.9	< 30
土壤紧实度 Soil hardness(kg/cm ²)	3 ~ 4	2 ~ 2.9	< 2

AMS: 高寒草甸土 Alpine meadow soil

1.4 土壤入渗速率的测定

入渗速率采用环刀定量加水法。样地内选择代表性 9 个不同演替阶段草地,在不破坏原生状态情况下垂直砸入环刀土表 1.5 cm,量取 50 mL 自来水缓缓倾注入环刀内并计时,等水分完全渗入土壤中表面无明水记录终止时间,9 次重复,利用达西(Darcy, H)模式计算土壤水分入渗速^[10]。 $K_t = \frac{Q}{A \times t} + \frac{L}{H + L}$ 。

式中: K_t 为某一时段内的入渗速率, Q 为透过土柱的水体积, A 为入渗面积, H 为固定水位深(mm), L 为土层厚度(mm), t 为透过水量 Q 所用的时间(min)。

1.5 数据分析

基础统计和分析利用 Excel2010 软件,采用 SPSS18.0 软件对土壤容重、最大持水量、毛管持水量、最小持水量和入渗速率进行 One-ANOVA 分析,多重比较用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 土壤持水性与孔隙状况

高寒草甸不同退化阶段,土壤总空隙度、非毛管孔隙度、毛管孔隙度总体呈现以下变化规律,即 $LG > MD > HG$,在 LG 中,土壤总空隙度、非毛管孔隙度、

毛管孔隙度分别为 64.02%、17.46% 和 46.56% 高于高寒草甸其他演替阶段。最低值出现在 HG,分别为 42.03%、11.76% 和 30.24%。同时,总空隙度、非毛管孔隙度、毛管孔隙度从另一个侧面反映了不同演替阶段土壤水分在土壤初始水分大小、土壤中滞留时间的长短和蓄水能力的大小。根据测定结果发现,严重退化阶段草地容纳降水能力较弱,水源涵养能力较差(见表 2)。

2.2 土壤水库贮水能力

非毛管孔隙水分与毛管孔隙贮蓄量之和为土壤水库总库容,它不仅反映水土保持功能和土壤水库贮蓄的潜在能力,也是反映调节水分循环和土壤涵养水源的重要指标。从土壤保水特性来看,吸持库容具有长时间保持在土壤中的能力,是植物根系吸收和土壤蒸散的主要来源;从土壤蓄水特性来看,滞留库容具有较快容纳降水并及时下渗的能力,是涵养水源的重要指标。

根据测定 0 ~ 8 cm 土层的孔隙度,计算得出不同演替阶段土壤各分库容(表 2)。随着高寒草甸退化加剧,严重退化草地测定土层土壤总库容和、土壤滞留库容、土壤吸持库容均呈现下降趋势。不同演替阶段, LG 阶段土壤滞留库容、土壤吸持库容最高,保水能力和蓄水能力较强。

表 2 不同演替阶段高山嵩草草甸的持水特性

Table 2 Water character of *K. pygmaea* meadow along with degraded sucesion process

项目 Items	土壤层次 Layer	孔隙度(%)			库容(t/hm^2)		
		总孔隙 Total porosity	非毛管 Non-capillary porosity	毛管 Capillary porosity	总库容 Soil storage capacity	滞留 Retention storage capacity	吸持 Holding storage capacity
LG	0~8cm	63.02	17.46	46.56	512.16	139.68	372.48
MG	0~8cm	59.85	16.34	43.51	478.80	130.72	348.08
HG	0~8cm	42.03	11.76	30.27	336.24	94.08	242.16

2.3 土壤渗透性的变化

在高寒草甸退化演替系列的进程中,不同演替阶段土壤水分渗透速率差异达到极显著水平($P < 0.01$)。图 1 可以看出, MG 阶段到 LG 水分入渗速率变化范围从 $7.08 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 减少到了 $3.48 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 而当草地严重退化到 HG 阶段土壤水分入渗速

率急剧增大, 为 $29.99 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$; 同时, 对于不同演替阶段饱和持水量的测定发现, HG 阶段土壤饱和持水量最低,

说明当高寒草甸严重退化, 土壤水分入渗速率极强, 而土壤的保水能力却最弱。

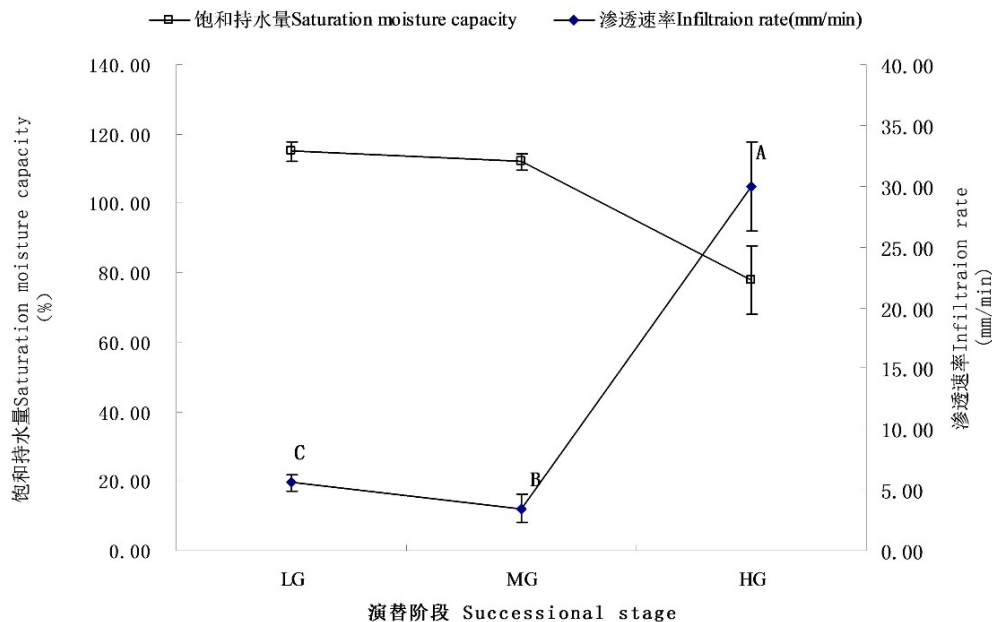


图 1 渗透速率和饱和持水量特征

Fig. 1 Characteristics of infiltration rate and saturation moisture capacity

2.4 土壤容重与孔隙度的变化

土壤容重和孔隙度是反映土壤物理性质的重要参数, 两者直接影响着土壤蓄水和通气性能。从图 2 可以看出, 不同退化演替阶段, 土壤容重均值 $HG > MG > LD$, 不同退化演替阶段土壤容重的范围 $0.65 \sim 0.95 \text{ g/cm}^3$ 。就孔隙度来看, 轻度放牧明显大于重度

放牧, 总孔隙度表现为: $LD > MG > HG$, 变化范围为 $64.15 \sim 75.47\%$ 。其中 HG 阶段最低, 这主要与严重退化草地植被地上生物量少, 分解腐烂的枯落物也少, 进而影响腐殖质的输入, 不利于团粒结构的形成有关。

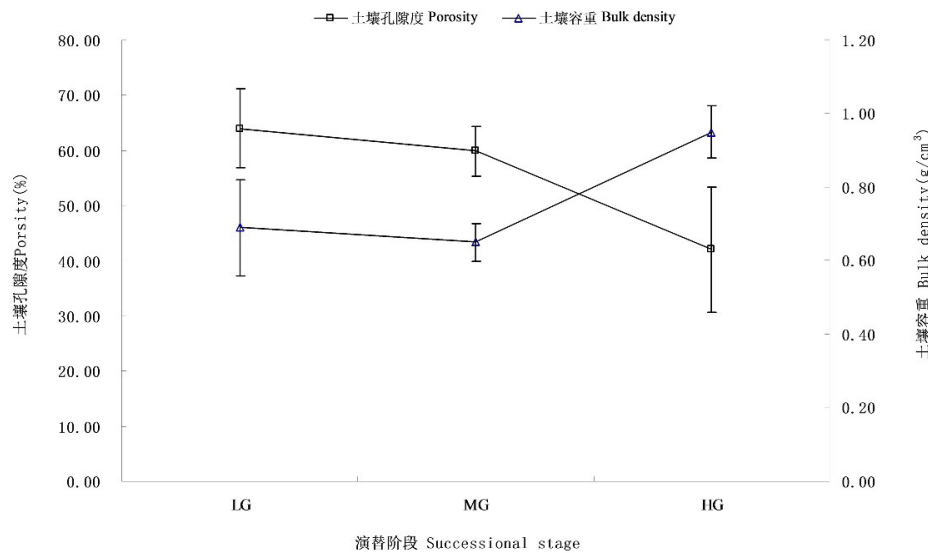


图 2 土壤孔隙度和土壤容重特征

Fig. 2 Characteristics of porosity and bulk density

2.5 土壤持水能力相关因子的分析

表 3 的相关分析表明,土壤持水量指标与土壤容重呈极显著负相关($P < 0.01$),和入渗速率显著负相关($P < 0.05$),孔隙度成显著正相关关系($P < 0.05$)。这与李婧等^[11]研究结果基本一致。土壤容重和孔隙度显著负相关($P < 0.05$),说明严重退化草地因过度

放牧,土壤压实程度较大,从而导致孔隙度较小,进而影响草地持水能力。同时,研究结果和段兴凤等^[12]研究的森林生态系统结果相反,说明土壤持水特性与其生态系统类型和立地条件可能有关,也可能试验只考虑了土壤水物理特征,有关根系等生物因素对土壤持水特性的影响有待进一步研究。

表 3 各指标相关性分析

Table 3 Correlation analysis of soil moisture capacity

	最大持水量 Max-moisture content	毛管持水量 Capillary moisture content	最小持水量 Min-moisture content	入渗速率 Infiltration rate	土壤容重 Bulk density	土壤孔隙度 Porosity
最大持水量 Max-moisture content	1.000	0.934**	0.327	-0.565*	-0.995**	0.995**
毛管持水量 Capillary moisture content		1.000	0.381	-0.397	-0.893**	0.893**
最小持水量 Min-moisture content			1.000	-0.136	-0.456*	0.532*
入渗速率 Infiltration rate				1.000	-0.723**	0.521*
土壤容重 Bulk density					1.000	-0.986**
土壤孔隙度 Porosity						1.000

注: * 表示 0.05 水平下相关性显著, ** 表示 0.01 水平下相关性显著

Note: * : significant correlation at the 0.05 level, ** : Significant correlation at the 0.01 level

3 讨论与结论

3.1 不同退化演替阶段土壤持水特征

土壤容重和土壤孔隙度是作为土壤水物理性能

的重要表征指标^[13]。在草地不同利用方式下土壤容重和土壤孔隙度呈现一定的变化趋势^[14]。本研究中不同退化演替阶段高寒草甸土壤容重和土壤孔隙度变异特征明显,且呈现极显著负相关关系($P <$

0.01)。在退化演替过程中3个阶段,严重退化草地植被覆盖度下降,土壤有机质输入减少,土壤紧实度增加,土壤物理性状呈现土壤孔隙度状况差、土壤容重变大。另外,土壤容重和孔隙度参数不仅决定土壤的导水性、保水性、透气性等,而且与植被生长密切相关,本研究仅从土壤物理性状描述了土壤持水性状,缺乏例如活根、死根数量及细根等地下根系与持水性状的关系,尚不能解释影响高山嵩草草甸土壤持水能力发挥的主要因子和水源涵养的主要机制,有待于进一步研究。从土壤入渗速率来看,在高寒草甸退化演替系列的进程中,不同演替阶段土壤水分渗透速率差异达到极显著水平($P < 0.01$)。同时和土壤容重和孔隙度存在一定的相关关系,这也说明不同退化演替阶段下土壤物理性状改变尤其是对土壤容重和孔隙度影响改变土壤渗透性。总体来说,LG阶段草地表现出土壤孔隙度大,土壤容重小,进而体现出土壤渗透性和持水能力状况良好,有效地减少了土壤侵蚀和地表径流,有显著防止水土流失效果。

3.2 不同退化演替阶段土壤水库特征及增贮潜力

近20年来,在全球气候变化和人类活动的双重影响下,三江源地区草地生态系统持续退化。据调查,全面退化是三江源区的草地的主要趋势,其中有 $0.12 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 中度以上退化草场面积,占三江源区可利用草场面积的58%^[15],其中“黑土滩”(重度退化草地)面积为 $1.8 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占退化草地面积的32.1%^[16]。根据本研究,在自然条件下,轻度退化草甸0~8 cm土壤最大持水量最高为 512.16 t/hm^2 ,重度退化0~8 cm土壤最大持水量最低为 336.24 t/hm^2 ,按照重度退化草甸 $1.8 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 粗略估计,三江源重度退化高寒草甸使草地土壤上层水源涵养量减少了 $3.16 \times 10^8 \text{ t}$ 。由于本研究仅对0~8 cm土壤层的土壤水源涵养量进行了初步研究,缺乏土壤下层土壤涵养量的计算,但研究也从另一个侧面反映了退化高寒草甸土壤涵养量的增储潜力的最低限,即退化草地恢复到自然状态下其土壤水分涵养量增储潜力至少约为 $3.16 \times 10^8 \text{ t}$ 。因

此,有关水源涵养量增储潜力有待进一步研究和验证。

参考文献

- [1]张超,王会肖. 土壤水分研究进展及简要评述[J]. 干旱地区农业研究 2003 21(4): 117-123.
- [2]SNYMA H A. Soil water utilisation and sustainability in a semi-arid grassland[J]. Water Use of South Africa 2000 26(3): 333-342.
- [3]赵锦梅,张德罡,刘长仲. 东祁连山土地利用方式对土壤持水能力和渗透性的影响[J]. 自然资源学报 2012 27(3): 422-430.
- [4]范月君,侯向阳. 三江源区高寒草甸退化与水塔功能的关系[J]. 西南民族大学(自然科学版) 2016 42(1): 8-13.
- [5]石红霄,范月君,侯向阳,等. 三江源区围栏与放牧高山嵩草草甸植物群落特征分析[J]. 中国草地学报 2014 36(4): 67-73.
- [6]ZHOU H K,ZHAO X Q,TANG Y H,et al. Alpine grassland degradation and its control in the source region of the Yangtze and Yellow Rivers,China[J]. Grassland Science 2005 51(3): 191-203.
- [7]胡雷,王长庭,王根绪,等. 三江源区不同退化演替阶段高寒草甸土壤酶活性和微生物群落结构的变化[J]. 草业学报 2014 23(3): 8-19.
- [8]BARBOUR M G,BURK J H,PITTS W D. Terrestrial plant ecology [M]. California: Benjamin/Cummings, 1980.
- [9]张扬,赵世伟,侯庆生,等. 云雾山草地植被恢复过程土壤水库特性及影响因素[J]. 水土保持学报 2009 23(3): 200-205.
- [10]孙艳红,张洪江,程金华,等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报 2006 20(2): 106-110.
- [11]李婧,杜若功,张法伟,等. 草毡表层演化对高寒草甸水源涵养功能的影响[J]. 草业学报 2012 20(5): 836-842.
- [12]段兴凤,宋维峰,李健,等. 云南省元阳梯田水源区森林土壤入渗特性研究[J]. 水土保持通报 2011 31(4): 47-52.
- [13]巍强,张秋良,代海燕,等. 大青山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报 2008 22(2): 111-114.
- [14]徐宁,吴兆录,李正玲. 滇西北亚高山不同土地利用类型土壤容重与根系生物量的比较研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(5): 1961-1963.
- [15]刘纪元,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[J]. 地理学报 2008 63(4): 364-377.
- [16]陈国明. 三江源地区“黑土滩”退化草地现状及治理对策[J]. 四川草原 2005(10): 37-44.

(责任编辑:李建忠,付强,张阳,罗敏;英文编辑:周序林,郑玉才)