

三江源区高寒草甸湿地植被退化与土壤有机碳损失

刘育红^{1,2}, 李希来¹, 李长慧¹, 孙海群¹, 芦光新¹, 潘根兴²

(1.青海大学农牧学院, 青海 西宁 810003; 2.南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 江苏 南京 210095)

摘要:人为活动影响下陆地生态系统退化对于土壤碳库损失的影响规模是当前全球变化研究的热点。在青海省三江源区选择了8个高寒草甸典型样区,划分4种不同退化程度样地(原生植被、轻度退化、重度退化、极度退化),收割法采集地上部植物生物量,10 cm等深度采集表土土壤样品,分析了地上生物量、可食牧草生物量以及土壤有机碳含量变化。结果表明,随着退化程度的加剧,地上生物量和饲草生物量均表现强烈下降的趋势,但后者的下降幅度更大,在极度退化下损失达99%。研究区内高寒湿地土壤的表土有机碳含量出现极大的变异性,随退化程度的加剧而呈显著下降。与原生植被下相比,轻度退化、重度退化和极度退化下0~30 cm土壤有机碳含量分别平均降低了25%、44%和52%。这种损失固然与地上部生物量下降有关,有机碳分层系数显示土壤侵蚀也是重要因素。估计退化下土壤有机碳平均下降 $36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,累积退化下表土有机碳损失可能在200 TgC以上,保护高寒草甸生态系统,对于三江源区土壤的畜牧业可持续发展和我国陆地生态系统碳库具有极重要的意义。

关键词:三江源区;高寒草甸湿地;土壤有机碳;植被生物量;生态系统退化

中图分类号:X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2559-09

Vegetation Decline and Reduction of Soil Organic Carbon Stock in High-altitude Meadow Grasslands in the Source Area of Three Major Rivers of China

LIU Yu-hong^{1,2}, LI Xi-lai¹, LI Chang-hui¹, SUN Hai-qun¹, LU Guang-xin¹, PAN Gen-xing²

(1.College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810003, China; 2.Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Degradation of terrestrial ecosystems under human disturbance and the effects on soil organic carbon stock change have been paid great attention in the context of global change issues. In this study, 8 typical areas of high altitude grasslands in the source area of the Yellow River, Yangtze River and Lancangjiang River, Qinghai Province, China were selected and 4 types of vegetation decline (primary vegetation, slightly declined, seriously declined and severely declined vegetation), were identified for vegetation plant mass and soil sampling. In each sampling plot, aboveground plant biomass were collected using total-cutting method and animal feed grass biomass were manually separated, and were weighed before and after oven-drying. Topsoil (0~30 cm) samples were collected using 10 cm depth interval sampling with a soil auger. And soil organic carbon content was measured with wet digestion and pyrochromate oxidation. Results showed that total aboveground plant biomass and feed biomass was dramatically decreased as the vegetation declined. Decline in feed biomass was more intense with almost 99% of feed biomass lost under severely declined vegetation, much variable contents of soil organic carbon was found with different vegetation decline status. Compared to under primary vegetation, topsoil (0~30 cm) SOC stock was shown in decline at 25%, 44% and 52% under slightly declined, seriously declined and severely declined vegetation respectively. SOC stratification within the topsoil indicated that soil truncation as a result of enhanced soil erosion by vegetation decline may have also impacted topsoil SOC stock decline apart from the decreased organic matter input due to vegetation decline. It is estimated, a topsoil SOC stock reduction of $36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ on average under vegetation decline. A total of over 200 Tg C may have been lost due to vegetation decline in this area. Therefore, preservation of the high altitude grasslands is critical for both ensuring the sustainability of animal husbandry in Qinghai Province and the protection of terrestrial soil carbon stock of China in the future facing the global warming challenge.

Keywords: source area of Three major rivers of China; high-altitude wetlands; soil organic carbon stock; vegetation biomass; ecosystem degradation

收稿日期:2009-09-22

基金项目:三江源区“黑土滩”恢复治理中几种适宜栽培草种丸粒化技术研究(30760160)

作者简介:刘育红(1973—),女,汉族,陕西宝鸡人,副教授,硕士。

通讯作者:潘根兴 E-mail: panggenxing@yahoo.com.cn

土壤碳库为地球表层生态系统中最大的碳储库,其中全球土壤有机碳库(SOC pool)约为 1 550 Pg^[1],是大气碳库的 2 倍,陆地生物碳库的 2~4 倍^[2-3]。土地利用和生态系统退化引起的植被和土壤碳库的历史损失是大气 CO₂ 浓度上升和全球变暖的主要驱动因子之一^[4-5]。全球土壤碳库的历史损失量估计达 55 Pg,分别占到人类活动下全球土壤碳库总消减的 2%和 31.4%。不当的土地利用和生态系统退化下我国土壤碳库的损失达 3.5 Pg^[6-7]。因此,研究人为利用下陆地生态系统植被与土壤碳库的变化特点对于了解生态系统变化的土壤碳库效应及其对于大气温室效应的影响具有重要科学价值。

生态系统退化会改变植被生产力及土壤有机质的积累和分解速率,进而影响到生态系统碳氮循环和土壤碳储量^[8]。同时,土壤有机质损失对于生态系统生产力功能产生负反馈,加剧生态系统的脆弱性。我国西部地区陆地生态系统较为脆弱,在人类不当利用和全球变化下发生不同程度生态系统退化^[9-12]。对喀斯特生态系统退化^[13]、沿海红树林退化和湿地退化^[14]的土壤性质变化及其土壤碳库变化特点的研究显示,生态系统退化下土壤碳库功能的快速丧失十分突出,成为我国生态系统稳定性与应对气候变化的严峻挑战。

三江源区地处青藏高原腹地,是长江、黄河、澜沧江的发源地和水源地,其总面积 36.31 万 km²,占全省国土面积的 50.4%^[15],是世界上海拔最高、面积最大、分布最为集中的高寒湿地生态系统。在人口急剧增加、草场过牧以及全球变暖的复杂影响下,该区生态系统发生了不同程度的退化,植被演替呈高寒草甸-退化高寒草甸-荒漠化地区的逆向演替^[16]。至 2006

年,三江源区 90%的草地存在退化,中度以上退化草场面积达 0.12 亿 hm²,占本区可利用草场面积的 58%。同 20 世纪 50 年代相比,单位面积产草量下降了 30%~50%,优质牧草比重下降了 20%~30%,有毒有害类杂草增加 70%~80%,草地植被盖度减少 15%~25%,优势牧草高度下降了 30%~50%。因植被退化而暴露的“黑土滩”面积已达 282.9 万 hm²,占可利用草地总面积的 15%。而严重退化导致土壤沙化的面积也已达 293.3 万 hm²,且每年仍以 0.52 万 hm² 的速度扩展。草场退化和荒漠化已严重威胁三江源地区的生态安全和畜牧业经济可持续发展。

本研究旨在对青海省三江源地区典型样区高寒草甸退化区生态系统生物量和土壤有机碳的调查基础上,分析不同退化生态系统地上部生物量和土壤有机碳的变化,讨论生态系统退化对土壤有机碳库损失的影响及其可能途径,为阐明生态系统退化对高寒草甸湿地土壤碳库稳定性及其气候变化效应提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然地理概况

研究区为青海省玉树州曲麻莱县、称多县、治多县、杂多县和果洛州玛多县等三江源东部地区,选择 8 个典型高寒草甸草地采样区(图 1 和表 1)。研究区处于东经 E 94°50'~98°40',北纬 N 32°30'~35°00',海拔 4 100~4 600 m,暖季短促,冷季漫长,高寒缺氧,且多雷电、冰雹、霜冻、大风和积雪;全年平均气温约为 -4℃,降水量 400 mm 左右,年蒸发量 730~1700 mm,属典型的高原大陆性气候^[17]。研究区内植被类型主要是小嵩草高寒草甸,其次是矮嵩草及小嵩草-矮

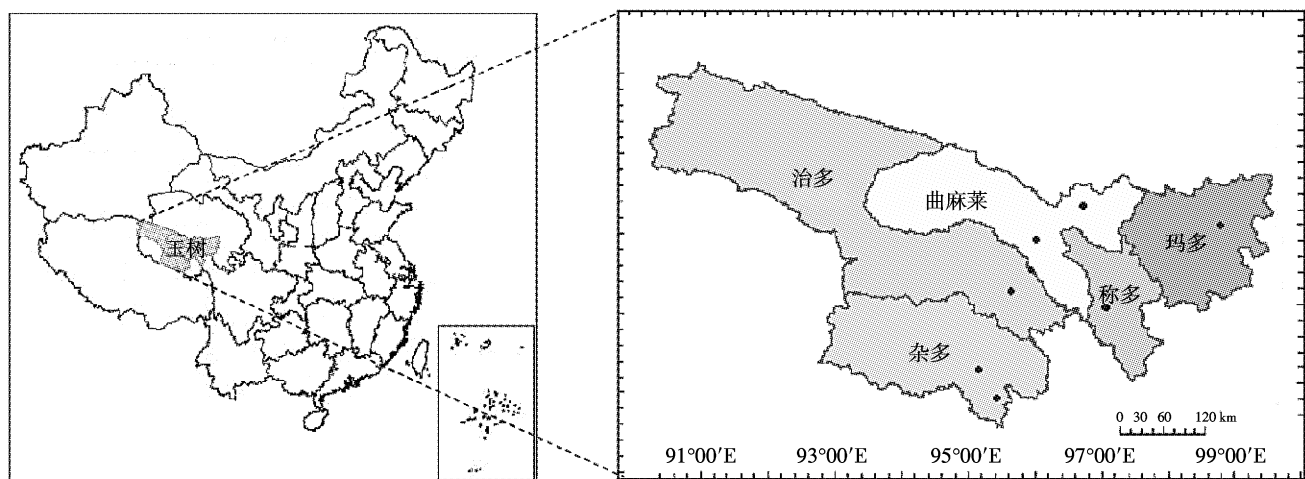


图 1 研究区及采样区分布

Figure 1 The region under study and the sampling area

表 1 采样区和样地基本情况
Table 1 Location and bio-geography of the sampled area

采样区 Sample area	退化程度 Degrdation	植物优势种 Dominant species	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude
玉树州治多县多彩乡 (DCX)	I	小嵩草+萎陵菜	95°21.985'	33°52.925'	4 576
	II	小嵩草+萎陵菜	95°21.971'	33°52.942'	4 588
	III	小嵩草+马先蒿	95°21.914'	33°52.897'	4 562
	IV	白苞筋骨草+细叶亚菊	95°21.916'	33°52.913'	4 573
玉树州曲麻莱县麻多乡 (MDX)	I	小嵩草	96°22.725'	35°02.869'	4 418
	II	小嵩草	96°22.729'	35°02.862'	4 420
	III	萎陵菜+盐地凤毛菊	96°22.773'	35°02.854'	4 422
	IV	西伯利亚蓼+盐地凤毛菊	96°22.826'	35°02.902'	4 419
玉树州曲麻莱县秋智乡 (QZX)	I	小嵩草	95°41.154'	34°33.936'	4 351
	II	小嵩草	95°41.125'	34°33.934'	4 335
	III	盐地凤毛菊	95°41.109'	34°33.952'	4 327
	IV	盐地凤毛菊	95°41.056'	34°33.936'	4 328
玉树州治多县知曲乡 (ZQX)	I	小嵩草+紫花针茅	95°38.432'	34°10.347'	4 170
	II	小嵩草+紫花针茅	95°38.411'	34°10.331'	4 177
	III	萎陵菜+盐生凤毛菊	95°38.510'	34°10.304'	4 171
	IV	紫花针茅+火绒草	95°38.473'	34°10.325'	4 170
玉树州杂多县苏鲁镇 (SLZ)	I	小嵩草	95°17.903'	32°31.363'	4 386
	II	小嵩草	95°17.872'	32°31.264'	4 306
	III	高山紫菀+华丽龙胆	95°17.894'	32°31.367'	4 334
	IV	黄帚橐吾+白苞筋骨草	95°17.897'	32°31.474'	4 360
玉树州称多县清水河镇 (QSH)	I	小嵩草	96°51.509'	33°47.011'	4 370
	II	小嵩草+火绒草	96°51.509'	33°47.025'	4 380
	III	披针叶黄华+黄帚橐吾	96°51.497'	33°47.069'	4 432
	IV	瓣蕊唐松草+异叶青兰	96°51.080'	33°47.052'	4 434
果洛州玛多县花石峡镇 (HSX)	I	矮嵩草	98°32.037'	34°56.213'	4 261
	II	矮嵩草	98°32.133'	34°56.152'	4 262
	III	细叶亚菊	98°32.195'	34°56.117'	4 262
	IV	细叶亚菊	98°32.197'	34°56.125'	4 262
玉树州杂多县阿多乡 (ADX)	I	矮嵩草	94°59.299'	32°51.314'	4 407
	II	小嵩草	94°59.297'	32°51.319'	4 405
	III	萎陵菜+棘豆	94°59.292'	32°51.319'	4 397
	IV	独活+棘豆	94°59.299'	32°51.286'	4 377

注:植被类型分别为:1.小嵩草草甸,分布于 DCX,MDX,QZX,SLZ 和 QSH 等样区;2.矮嵩草草甸,分布于 HSX 样区;3.小嵩草-矮嵩草草甸,分布于 ADX 样区。退化程度:Ⅰ.原生植被;Ⅱ.轻度退化;Ⅲ.重度退化;Ⅳ.极度退化。

嵩草过渡型高寒草甸。土壤类型为高寒草甸土(中国土壤发生分类制)^[18]、湿润均腐土(中国土壤系统分类)^[19]、寒冷软土(Cryoborolls 或 Halpoborolls,美国土壤系统分类制)^[20]。

1.2 不同退化梯度与生态系统样块选择

根据李希来等(2002 年)对该地区高寒草地的退化等级划分^[21-22],根据草甸植被的种类组成及其数量特征,在 8 个样区内分别选择了不同退化程度的草甸生态系统样块,即原生植被(Ⅰ)、轻度退化(Ⅱ)、重度退化(Ⅲ)和极度退化(Ⅳ)等样块。8 个样区 4 个退化

梯度共计构成 32 个样块供采样研究。土壤及植物的采样于 2006 年 8 月进行。

1.3 植被生物量采样与植物种鉴定

按“收割样方法”^[23]采集植物地上部分生物量。在每个样块,随机划出 1 m×1 m 的样方 3 个,沿地表分植物种剪取植株地上部分,装袋带回实验室,并置于烘箱内在 80 ℃温度下烘干至质量恒定,计算每个样方的生物量。植物种组成采用肉眼鉴定。

1.4 土壤采样与样品分析

在每个样块随机选取 3 点,实地挖掘土壤剖面,

自上而下用移除法分别采集 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 等 3 个深度的土样,样品盛于塑料自封袋,运回实验室。拣去植物残根和石砾等,并计量(仅重度和极度退化下表土石砾含量会占相当比例,多至占 10%),自然风干后,磨碎过 2 mm 筛。四分法分取部分,瓷研钵磨碎,过 0.15 mm 筛。土壤有机碳测定采用外加热重铬酸钾氧化容量法^[24]。

1.5 数据整理与统计分析

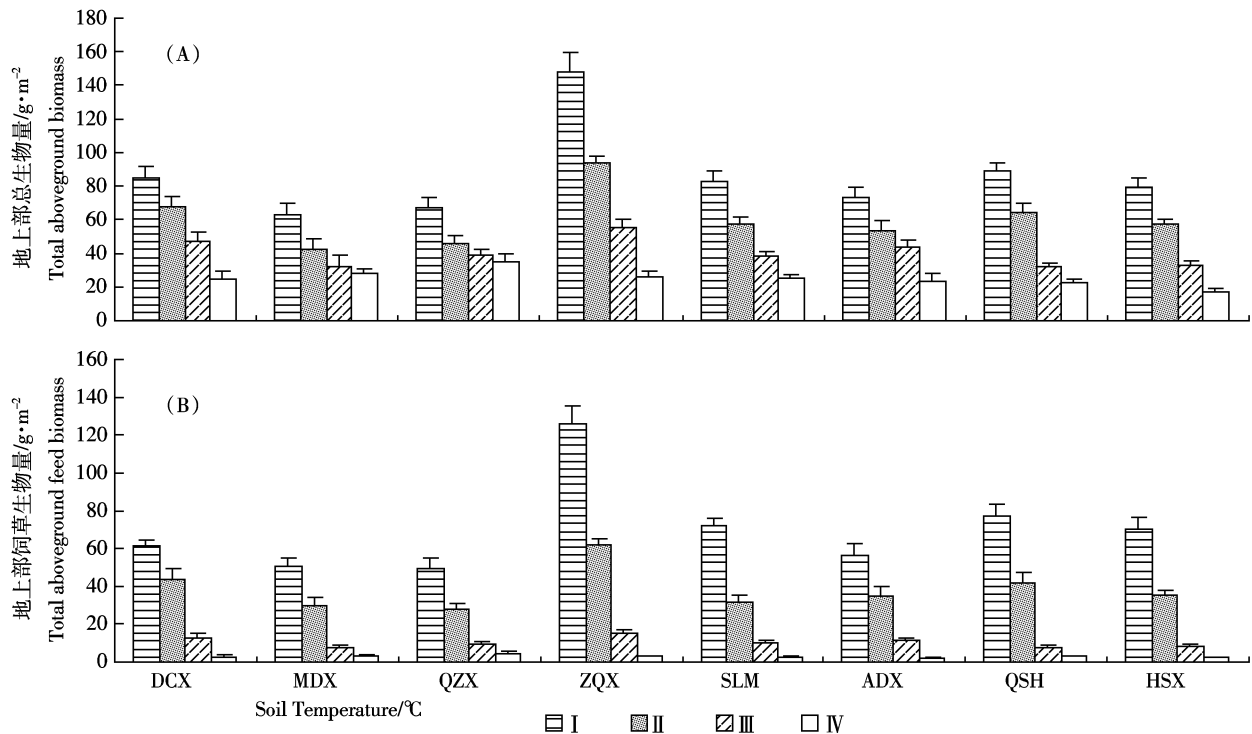
对地上生物量和土壤有机碳含量进行分析统计,

所有测定在 Excel 2003 上处理,对不同退化梯度间的差异采用 SPSS 12.0 软件统计($P<0.05$)。

2 结果分析

2.1 不同退化生态系统下地上部生物量

随着高寒草甸草地退化程度的加剧,植物群落的组成和优势种发生了很大的变化,表现为杂类草入侵并逐步替代莎草科植物而形成以杂草为优势种的植物群落演替^[25],影响地上部生物量变化。由图 2 和表 2



(I.原生植被; II.轻度退化; III.重度退化; IV.极度退化)

(I, II, III and IV represents undegraded, slightly degraded, heavily degraded and severely degraded vegetations respectively)

图 2 样地地上部总生物量(A)和饲草生物量(B)变化

Figure 2 Variation of total aboveground (A) and feed biomass (B) with the sampling sites

表 2 不同退化程度草甸地上部生物量分布($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

Table 2 Aboveground biomass in different degradation meadow($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

样区	DCX	MDX	QZX	ZQX	SL	ADX	QSH	HSX	平均
总生物量(Total biomass)									
I	85.0±6.9	62.8±6.7	67.2±5.7	147.7±11.7	82.9±5.8	73.3±6.1	89.3±4.2	79.2±5.4	85.9±26.5a
II	67.5±6.4	42.3±6.5	45.8±5.0	93.6±4.5	57.7±4.1	53.3±6.0	64.6±5.4	57.7±2.5	60.3±15.9b
III	47.2±5.6	32.3±6.7	38.8±3.4	55.3±4.8	38.2±2.8	43.5±4.7	32.0±2.5	33.1±2.4	40.0±8.2c
IV	24.6±5.1	28.3±2.3	34.8±4.7	26.1±3.6	25.3±2.3	23.2±4.5	22.9±2.0	17.3±1.9	25.3±5.0c
可食部分生物量(Edible parts biomass)									
I	61.2±3.3	50.8±4.6	49.2±5.9	126.0±9.4	72.2±3.9	56.4±6.0	77.3±6.0	70.1±6.2	70.4±24.7a
II	43.6±5.7	30.0±4.3	27.8±3.3	61.9±3.1	31.9±3.3	34.7±5.1	41.6±5.7	35.1±2.8	38.3±11.0b
III	12.8±2.5	7.5±1.6	9.2±1.4	15.5±1.4	10.1±1.5	11.7±1.3	7.8±1.3	8.2±1.1	10.4±2.8c
IV	2.7±1.1	3.4±0.5	4.3±1.4	3.0±0.4	2.7±0.4	2.1±0.7	2.9±0.5	2.2±0.6	2.9±0.7d

可见,8 个样区 4 种退化梯度下地上生物量和可食牧草生物量均表现为随退化程度的加剧而呈显著下降的趋势,即原生植被土壤>轻度退化土壤>重度退化土壤>极度退化土壤,地上生物量均随草甸退化的不断演替而依次显著降低,并且可食牧草生物量下降更为突出。这是由于随着退化,阔叶型杂类草不断入侵,优良禾本科牧草植物种的优势不断丧失。这种特征已经在周华坤等^[26-27]的研究中得到充分论证。与原生植被土壤相比,轻度退化、重度退化和极度退化土壤的地上生物量分别平均降低了 29.8%、53.4%和 70.5%,而可食牧草生物量分别平均降低了 45.5%、85.3%和 95.9%。相对于原生植被,极度退化下地上部总生物量由 $(147.8 \pm 11.69) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 降到 $(17.3 \pm 1.89) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,可食牧草生物量变化由 $(126.0 \pm 9.38) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 降到 $(2.23 \pm 0.57) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。可见,极度退化下地上部生物量相对于原生植被下地上部生物量平均降低了 89%,而可食牧草生物量则下降了 98%,几乎损失殆尽。因此,在退化下,生态系统的支持功能的退化比生物量本身的退化更为快速,这也是生态系统退化的严峻性所在。

2.2 土壤有机碳变化

2.2.1 土壤有机碳的总体分布

将测定的所有 32 个样点的 0~10 cm 有机碳含量统计的频度分析示于图 3。可以看出,这些不同退化生态系统的表层土壤有机碳含量已不呈正态分布。土壤(0~10 cm)有机碳含量变幅很大($3.54 \sim 45.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),

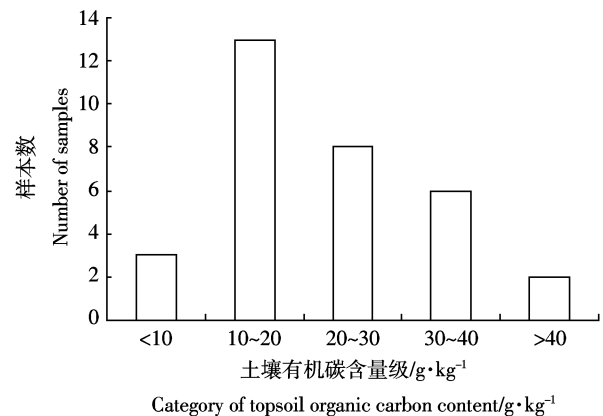


图 3 表层土壤(0~10 cm)有机碳含量频度分布

Figure 3 Diagram of frequency of soil organic carbon measurements of 0~10 cm layer

平均有机碳含量为 $21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。占总样本数 84.38% 样本的有机碳含量在 $10 \sim 40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,而有 40.63% 样本的有机碳含量集中在 $10 \sim 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。这反映了土壤有机碳含量的极大变异性。

2.2.2 生态系统退化下土壤有机碳变化

由表 3 可见,4 种退化梯度下土壤各层有机碳含量均表现为随退化程度的加剧呈显著下降的趋势,即原生植被土壤>轻度退化土壤>重度退化土壤>极度退化土壤,但 10~20 cm 和 20~30 cm 土层土壤有机碳含量不同退化程度间的差异显著性较表层低,且表层土壤有机碳含量的样点间变异性随着退化加剧而增

表 3 不同退化程度草甸土壤表土各层有机碳含量分布($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 3 Surface soil organic carbon in different degradation meadow($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

	DCX	MDX	QZX	ZQX	SLZ	ADX	QSH	HSX	平均
0~10 cm									
I	33.53±0.85	32.02±1.24	15.66±1.25	45.42±1.12	32.08±1.06	32.31±0.83	24.19±0.87	14.85±0.93	28.76±10.14a
II	30.39±1.17	23.67±0.82	14.21±0.92	41.01±1.53	24.19±0.87	24.30±1.28	21.11±0.90	11.48±1.13	23.80±9.19b
III	27.78±0.98	10.73±0.97	11.54±1.09	32.08±0.86	16.53±0.77	24.01±1.68	11.08±1.35	8.00±1.46	17.72±9.05c
IV	18.10±1.02	10.56±1.17	10.79±0.81	23.90±1.08	15.43±1.34	17.17±1.31	8.35±0.91	3.54±0.90	13.48±6.42d
10~20 cm									
I	30.80±0.80	20.42±0.82	9.69±1.03	35.27±1.07	24.77±0.97	26.91±1.22	16.30±1.03	10.73±0.81	21.86±9.25a
II	22.97±0.87	15.66±0.65	8.06±0.78	30.92±0.66	15.78±1.05	17.52±0.66	15.14±0.80	9.86±0.94	16.99±7.24b
III	19.43±1.20	7.71±1.05	7.60±1.18	24.71±0.70	9.34±1.03	14.97±1.16	7.48±1.05	5.28±0.87	12.06±2.93c
IV	15.49±1.13	8.00±0.87	6.90±0.83	17.87±1.25	10.15±0.67	15.20±1.37	7.77±1.07	3.42±0.78	10.60±5.04d
20~30 cm									
I	26.80±0.51	15.02±0.64	8.76±0.49	30.63±0.46	17.23±0.62	24.88±0.46	11.19±0.51	9.74±0.49	18.03±8.40a
II	16.13±1.36	7.77±0.40	5.22±0.55	25.17±0.53	8.12±0.62	9.86±0.53	6.61±0.40	4.76±0.49	10.46±6.93b
III	15.43±0.60	6.79±0.75	6.55±0.50	18.10±0.61	7.08±0.44	7.37±0.38	6.79±0.75	6.55±0.50	8.77±5.27c
IV	10.44±0.44	4.99±0.34	4.81±0.25	11.72±0.64	6.44±0.53	8.00±0.57	4.81±0.39	2.20±0.39	6.68±3.19c

注:小写字母表示采用 LSD 最小显著法检验不同退化程度间 $P < 0.05$ 水平下的差异性。

Note: Lowcase letters indicate significant different between the different degradation grades at $P < 0.05$ by using LSD tests.

高(原生植被、轻度退化、重度退化和极度退化下的 CV 依次是 35%、39%、51%和 48%)。说明表层土壤有机碳含量在生态系统退化下的变化最剧烈。尽管不同退化程度草地土壤有机碳主要分布在 0~10 cm 土层,且明显高于其他土层。与原生植被土壤相比,轻度退化、重度退化和极度退化下 0~30 cm 土壤有机碳含量分别平均降低了 25.4%、43.8%和 52.2%。相应地,0~10 cm 土层有机碳含量分别下降了 17.4%、38.2%和 53.2%,10~20 cm 土层分别降低了 22.2%、44.8%和 46.9%,而 20~30 cm 土层则分别降低了 42.0%、51.4%和 63.0%。因此,退化下深层土壤有机碳含量的下降幅度大于表层土壤,而深层有机碳含量的极高的样点间变异性也佐证了退化对亚表层有机碳含量的强烈影响。

3 讨论

3.1 生态系统退化下土壤有机碳含量变化与生物量变化的关系

在一个稳定的生态系统中,土壤有机碳含量决定于植物有机物质输入与土壤异氧微生物呼吸损失的平衡。但是,生态系统退化因为植物生物量下降而减少了输入,可导致土壤有机质在微生物利用下趋于减少。杨力军等报道了高寒草甸的退化减少了植被生产力和土壤有机质输入量,并加快了土壤有机质分解速率,使土壤有机质大量流失^[28-29]。有研究表明,群落物种组成的改变不仅影响有机碳输入的数量,也影响输入土壤的有机碳的质量,从而影响有机碳在土壤中的蓄积^[30]。但是,上述结果表明,植被退化与土壤有机碳降低并不同步,这可能与土壤具有比植被更大的稳定性有关。图 4 是不同样点间表层(0~10 cm)土壤有机碳含量差异与生物量差异的关系,生物量的差异只能解释 45%的样本间的表层有机碳含量的差异,尽管表层有机碳含量与植物生物量的关系最密切。因此,在三江源地区,生态系统退化下生物量衰减并不能说明有机碳含量下降而损失的主要原因。

植被覆盖条件的恶化,可能进一步加剧流水和风蚀等侵蚀而不断剥蚀土壤,使低有机碳含量的原心土层不断趋近地表,同样导致所采深度的有机碳含量的降低。供试土壤属于均腐土,其主要特征是表土有机质含量较高,且深度分布(0~30 cm 内)较均一^[19-20]。这里参考 Franzluebbers^[31]提出的有机碳含量土壤分层性指标,分析不同退化程度下样块 0~30 cm 深度的平均有机碳含量与分层系数的关系,示于图 5。可见,分层性系数的分布出现两种情况。平均有机碳含量高于

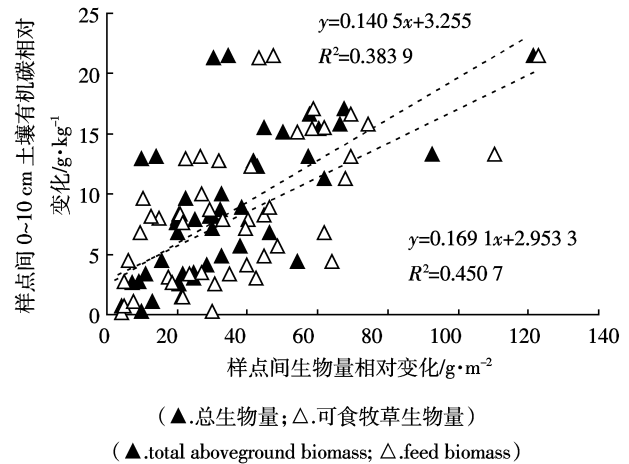
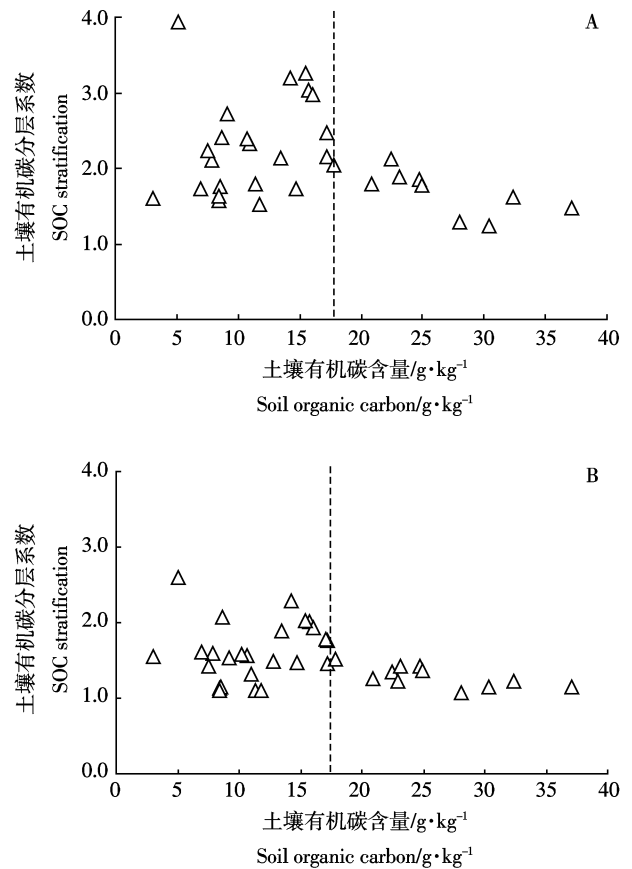


图 4 供试所有样块不同退化梯度两两间生物量变化与 0~10 cm 土壤有机碳含量变化的关系

Figure 4 The change of two-two biomass and soil organic carbon contents of 0~10 cm layer on sample area of different degradation grade



(A, 0~10 cm 与 20~30 cm 间的比值; B, 0~10 cm 与 10~20 cm 间的比值)
(A, 0~10 cm/20~30 cm; B, 0~10 cm/10~20 cm)

图 5 供试样块(0~30 cm)土壤有机碳含量与有机碳分层系数的关系

Figure 5 Relationship between the contents of soil organic carbon (0~30 cm) and soil organic carbon layer factor of sample area

15 g·kg⁻¹ 的情形下,分层系数随有机碳含量升高趋于下降,在有机碳含量高于 18 g·kg⁻¹ 下,0~10 cm 与 20~30 cm 和 0~10 cm 与 10~20 cm 的分层系数都分别小于 2 和 1.5。

由表 3 可知,主要是原生植被和部分轻度退化下的生态系统,它们保持了原来较厚的腐殖质层,有机碳含量越高,腐殖质层越厚。而有机碳含量低于 15 g·kg⁻¹ 的样块,是处于不同退化的生态系统,分层系数有随着有机碳含量的提高而升高的趋势。生态系统退化加剧了土壤侵蚀,腐殖质层不同程度地遭受剥蚀,低有机碳含量的心土层不断接近地表,使表层与下层的有机碳含量比值拉大,例如“黑土滩”的情形。而如果退化到沙化土壤状态,因腐殖质层几近剥失,心土层接近地表,因本来有机碳含量低,故分层系数反而降低。统计表明,0~10 cm/20~30 cm 的分层系数,仅是轻度退化下显著高于原生植被下和极度退化下,而其他两两之间没有差异。反之,0~10 cm/10~20 cm 的分层系数变化是,仅是原生植被下低于轻度退化和极度退化下,说明极度退化下可能出现的黑土滩,心土层接近地表。Franzluebner^[31]指出,美国旱地农田近地表的两层间分层系数高指示有机碳含量低。Pan 等^[32]对太湖地区水稻土的研究显示,该两层间系数低代表高的表土有机碳含量。因此,在低有机碳含量范围,分层系数的提高指示着土壤侵蚀的发生,而降低了土层的有机碳含量。所以说,除了生物量因素外,植被退化下土壤侵蚀也是导致土壤有机碳降低的重要原因。

3.2 不同退化下土壤有机碳密度的变化

根据 Song 等^[33]研究报道的自然土壤有机碳与容重的关系,并考虑到退化下土壤砾石含量的变化,我们可以估算各样地不同退化生态系统土壤有机碳密度的变化。原生植被下表土(0~30 cm)有机碳密度平均高达 80 tC·hm⁻²,轻度退化下下降为 63 tC·hm⁻²,重度退化下进一步下降为 40 tC·hm⁻²,而极度退化下仅保持不到 30 tC·hm⁻²。供试高寒草甸生态系统自然植被下表土碳密度略高于欧洲(70.8 tC·hm⁻²),明显高于全球平均表土有机碳密度(47.8 tC·hm⁻²),且大大高于我国自然土壤表土平均有机碳密度(50 tC·hm⁻²)^[34]。因此,未退化高寒草甸湿地生态系统是我国的重要土壤碳库^[35-39]。与原生植被土壤相比,轻度退化、重度退化和极度退化土壤的有机碳密度降低幅度依次分别达到 25%、45%和 60%,退化下有机碳密度平均下降了 36 tC·hm⁻²。假设目前已有的沙化土壤全部是原生植被退化所致,则退化引起的土壤有机碳损失约达

150 TgC,加上大面积的退化“黑土滩”,三江源区高寒湿地生态系统退化引起的土壤有机碳损失可能达到 200 Tg 以上。而张旭辉等^[40](2008)估计我国湿地退化的表土有机碳总损失约为 1.5 PgC。看来,三江源区目前已经成为我国陆地碳源的突出地区,保护高寒草甸生态系统,不但是保障牧区可持续发展,而且是保护我国陆地碳库的极为重要的任务。

4 结论

三江源区高寒草甸生态系统随着植被的退化,生物量,特别是饲草生物量强烈衰减,同时土壤有机碳含量也依次强烈下降。不过,土壤有机碳的衰减趋势显著低于地上部生物量的变化。退化中土壤有机碳含量降低除了受生物量影响外,还与植被退化下土壤侵蚀而失去高有机碳含量的表层有关。生态系统退化强烈地降低了土壤碳库,估计该区表土有机碳损失总量在 200 Tg 以上。因此,三江源区高寒草甸湿地的保护对于稳定陆地生态系统碳汇功能极其重要。

参考文献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304: 1623-1627.
- [2] Lal R. World soils and the greenhouse effect[J]. *IGBP Global Change Newsletter*, 1999, 37: 4-5.
- [3] Watson R T, Noble I R. Carbon and the science-policy nexus: The Kyoto challenge. //Steffen W, Jager J, Carson D, Bredshaw C, eds. *Challenges of a changing earth. Proceedings of the global change open science conference*[M]. Berlin: Springer, 2001: 57-64.
- [4] Enkinson D J, Adams D, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming[J]. *Nature*, 1991, 351: 304-306.
- [5] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The US carbon budget: contribution from land-use change[J]. *Science*, 1999, 285: 574-578.
- [6] Lal R. Soil management and restoration for C sequestration to mitigate the accelerated greenhouse effect [J]. *Progress in Environmental Science*, 1999, 1: 307-326.
- [7] Lal R. Soil C sequestration in China through agricultural intensification and restoration of degraded and decertified soils[J]. *Land Degradation & Development*, 2002, 13: 469-478.
- [8] Lal R, Fausey N R, Eckert D J. Land use and soil management effects on emissions of radiatively active gases from two soils in Ohio [M]//Lal R, Kimble J, Levine E, Stewart B A. *Soil management and greenhouse effect*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995: 41-59.
- [9] 汤洁, 毛子龙, 韩维峥, 等. 土地利用/覆被变化对土地生态系统有机碳库的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(5): 2008-2013.
TANG Jie, MAO Zi-long, HAN Wei-zheng, et al. Impact of land use/cover changes on the organic carbon storage of land ecosystem[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(5): 2008-2013.

- [10] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 等. 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 [J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(2): 225-230.
- WANG Chang-ting, LONG Rui-jun, WANG Qi-lan, et al. 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[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 14(2): 225-230.
- [11] 赵文智, 程国栋. 人类土地利用的主要生态后果及其缓解对策[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 369-374.
- ZHAO Wen-zhi, CHENG Guo-dong. The impacts of land utilization on earth land ecosystem and the strategies[J]. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(4): 369-374.
- [12] 周广胜, 王玉辉, 蒋延玲, 等. 陆地生态系统类型转变与碳循环[J]. 植物生态学报, 2002, 26(2): 250-254.
- ZHOU Guang-sheng, WANG Yu-hui, JIANG Yan-ling, et al. Conversion of terrestrial ecosystems and carbon cycling[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(2): 250-254.
- [13] 戴礼洪, 闫立金, 周 莉. 贵州喀斯特生态脆弱区植被退化对土壤质量的影响及生态环境评价[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(9): 3850-3852.
- DAI Li-hong, YAN Li-jin, ZHOU Li. Effects of the vegetation degradation in vulnerable Karst ecological region in Guizhou Province on soil quality and its ecological environmental evaluation[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(9): 3850-3852.
- [14] 张祥霖, 石盛莉, 潘根兴, 等. 互花米草入侵下福建漳江口红树林湿地土壤生态化学变化[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 974-981.
- ZHANG Xiang-lin, SHI Sheng-li, PAN Gen-xing, et al. Changes in eco-chemical properties of a mangrove wetland under *Spartina invasion* from Zhangjiangkou, Fujian, China[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 974-981.
- [15] 青海省统计局. 青海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008: 7, 14-15.
- Qinghai bureau of statistics. Qinghai statistical yearbook [M]. Beijing: China statistics press, 2008: 7, 14-15.
- [16] 三江源生态考察报告 [EB/OL]. <http://www.hwcc.com.cn/news-diplay/2006-08-08/154921>.
- [17] 黎 与. 青海三江源“黑土滩”形成的自然、人为因素和生物学机制[J]. 草业与畜牧, 2007(4): 27-29.
- LI YU. Human, Natural factors and formative mechanism formed “Black soil patch” in Qinghai Sanjiangyuan Area[J]. *Prataculture & Animal Husbandry*, 2007(4): 27-29.
- [18] 青海省农业资源区划办公室. 青海土壤[M]. 北京: 农业出版社, 1997: 312-319.
- Regional planning office of agricultural resources in Qinghai. Qinghai soil[M]. Beijing: Agriculture Press, 1997: 312-319.
- [19] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 土壤发生与系统分类 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 140-164, 353-355.
- GONG Zi-tong, ZHANG Gan-lin, CHEN Zhicheng, et al. Soil genesis and taxonomy[M]. Beijing: Science Press, 2007: 140-164, 353-355.
- [20] USDA, Soil Conservation Service, Keys to Soil Taxonomy, 6th edition, 1994: 187-204.
- [21] 李希来. 青藏高原“黑土滩”形成的自然因素与生物学机制[J]. 草业科学, 2002, 19(1): 20-22.
- LI Xi-lai. Natural factors and formative mechanism of “Black Beach” formed on grassland in Qinghai Tibetan plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2002, 19(1): 20-22.
- [22] 马玉寿, 郎百宁, 李青云, 等. 江河源区高寒草甸退化草地恢复与重建技术研究[J]. 草业科学, 2002, 19(9): 1-4.
- MA Yu-shou, LANG Bei-ning, LI Qing-yun, et al. Study on rehabilitating and rebuilding technologies for degenerated alpine meadow in the Changjiang and Yellow river source region[J]. *Pratacultural Science*, 2002, 19(9): 1-4.
- [23] Chapman S B. Trans. Yang Hanxi. 1980. Method for Plant Ecology[M]. Beijing: Science Press. 1976.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House, 2000.
- [25] 李海英, 彭红春, 王启基. 高寒矮嵩草草甸不同退化演替阶段植物群落地上生物量分析[J]. 草业学报, 2004, 13(5): 26-32.
- LI Hai-ying, PENG Hong-chun, WANG Qi-ji. Study on the above-ground biomass of plant communities among the stages of regressive succession in alpine Kobresia humilis meadow[J]. *Acta Pratacultural Science*, 2004, 13(5): 26-32.
- [26] 周华坤, 赵新全, 周 立, 等. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J]. 草业学报, 2005, 14(3): 31-40.
- ZHOU Hua-kun, ZHAO Xin-quan, ZHOU Li, et al. A study on correlations between vegetation degradation and soil degradation in the ‘Alpine Meadow’ of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Pratacultural Science*, 2005, 14(3): 31-40.
- [27] 周华坤, 周 立, 赵新全, 等. 江河源区“黑土滩”型退化草场的形成过程与综合治理[J]. 生态学杂志, 2003, 22(5): 51-55.
- ZHOU Hua-kun, ZHOU Li, ZHAO Xin-quan, et al. Degradation process and integrated treatment of “black soil beach” grassland in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(5): 51-55.
- [28] 杨力军, 李希来. 青藏高原“黑土滩”退化草地植被演替规律的研究[J]. 青海草业, 2005, 14(1): 1-5.
- YANG Li-jun, LI Xi-lai. Research or regulation of vegetation succession in degraded grassland in Qinghai and Tibetan plateau [J]. *Qinghai Prataculture*, 2005, 14(1): 1-5.
- [29] 王根绪, 程国栋, 沈永平, 等. 土地覆盖变化对高山草甸土壤特性的影响[J]. 科学通报, 2002, 47(23): 1771-1777.
- WANG Gen-xu, CHENG Guo-dong, SHEN Yong-ping, et al. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(23): 1771-1777.
- [30] 周广胜, 王玉辉, 蒋延玲, 等. 陆地生态系统类型转变与碳循环[J]. 植物生态学报, 2002, 26(2): 250-254.
- ZHOU Guang-sheng, WANG Yu-hui, JIANG Yan-ling, et al. Conversion of terrestrial ecosystems and carbon cycling[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(2): 250-254.
- [31] Franzluebbers A J. Water infiltration and soil structure related to or-

- ganic matter and its stratification with depth[J]. *Soil Tillage Res*, 2002, 66:197-205.
- [32] Pan G X, Wu L S, Li L Q, et al. Organic carbon stratification and size distribution of three typical paddy soils from Taihu Lake region, China. [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(4):463-465.
- [33] Song G, Li L, Pan G, et al. Topsoil organic storage of China and its loss by cultivation[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 74:47-62.
- [34] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5):282-289.
- PAN Gen-xing. Soil Organic Carbon Stock, Dynamics and Climate Change Mitigation of China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(5):282-289.
- [35] 冯永忠, 杨改河, 王得祥, 等. 近40年来江河源区草地生态压力动态分析[J]. 生态学报, 2009, 29(1):492-498.
- FENG Yong-zhong, YANG Gai-he, WANG De-xiang, et al. Ecological stress in grassland ecosystems in source regions of Yangtze, Yellow and Lancang Rivers over last 40 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1):492-498.
- [36] 林超峰, 陈占全, 薛泉宏, 等. 青海三江源区植被退化对土壤养分和微生物区系的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(6):788-793.
- LIN Chao-feng, CHEN Zhan-quan, XUE Quan-hong, et al. Effect of vegetation degradation on soil nutrients and microflora in the San-jiangyuan Region of Qinghai, China[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2007, 13(6):788-793.
- [37] 慕宗杰. 草地生态系统的保护及治理对策[J]. 畜牧与饲料科学, 2009, 30(2):48-49.
- MU Zong-jie. Protection and Control Countermeasures of Grassland Ecosystem[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2009, 30(2):48-49.
- [38] 任京辰, 张平究, 潘根兴, 等. 岩溶土壤的生态地球化学特征及其指示意义[J]. 地球科学进展, 2006, 21(5):504-512.
- REN Jing-chen, ZHANG Ping-jiu, PAN Gen-xing, et al. Indices of Eco-Geochemical Characteristics in A Degradation-Reclamation Sequence of Soils in Mountainous Karst Area: A Case Study in Guanling-Zhenfeng Region, Guizhou, China[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(5):504-512.
- [39] 林凡, 李典友, 潘根兴, 等. 皖江自然湿地土壤碳密度及其开垦为农田后的变化[J]. 湿地科学, 2008, 6(2):192-197.
- LIN Fan, LI Dan-you, PAN Gen-xing, et al. Organic carbon density of soil of wetland and its change after cultivation along the Yangtze River in Anhui Province, China[J]. *Wetland Science*, 2008, 6(2):192-197.
- [40] 张旭辉, 李典友, 潘根兴. 中国湿地土壤碳库保护与气候变化问题[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(4):202-208.
- ZHANG Xu-hui, LI Dian-you, PAN Gen-xing. Conservation of wetland soil C stock and climate change of China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(4):202-208.