

土地利用方式对高寒草甸土壤有机碳及其组分的影响

李月梅^{1,2}, 曹广民^{1*}, 徐仁海² (1.中国科学院西北高原生物研究所, 青海西宁 810001 2.青海省农林科学院, 青海西宁 810016)

摘要 [目的] 探讨土壤碳库的变化规律。[方法] 以原生高寒草甸、人工草地和农田(油菜地)作为研究对象, 利用土壤有机碳密度分组法, 研究3种土地利用方式对高寒草甸土壤有机碳(SOC)及轻组有机碳(LFOC)含量变化的影响。[结果] 3种土壤0~40 cm土体内, SOC含量依次为人工草地>高寒草甸>油菜地, 分别为113.13、111.61和93.54 t/hm²; LFOC含量依次为人工草地>高寒草甸>油菜地, 分别为10.36、8.93和5.83 t/hm²。人工草地与高寒草甸相比, 0~40 cm土壤SOC含量间差异不明显, 但LFOC高16.01%。耕作20年的农田中, SOC和LFOC分别较高寒草甸低16.19%、34.71%。[结论] 人工草地土壤中总SOC和LFOC则略高于高寒草甸, 明显高于农田, 人工草地和高寒草甸的植物-土壤系统的总固碳量明显高于农田。

关键词 土地利用; 高寒草甸; 土壤有机碳; 轻组有机碳

中图分类号 S153.6 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2008)14-05951-03

Effects of Different Land Use Modes on Organic Carbon and Its Component in Alpine Meadow Soil

LI Yue-mei et al. (Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Science, Xining, Qinghai 810001)

Abstract [Objective] This study aimed to explore the law of variation of soil carbon pool. [Method] With the land types of alpine meadow, artificial grassland and farmland (rapeseed field) as research objects, the effect of 3 kinds of soil land using modes on the change of soil organic carbon (SOC) and light fraction organic carbon (LFOC) contents were studied. [Results] In 0-40 cm soil body of 3 kinds of lands, the contents of SOC in order were: artificial grassland>alpine meadow>rapeseed field, with the amount of 113.13, 111.61 and 93.54 t/hm² resp.; the contents of LFOC in order were artificial grassland > alpine meadow > rapeseed field, with the amount of 10.36, 8.93 and 5.83 t/hm² resp. Compared with alpine meadow, the content of SOC in 0-40 cm soil body in artificial grasslands had not changed obviously, but the content of LFOC was increased by 16.01%. The contents of SOC and LFOC in farmland cultivated for 20 years were decreased by 16.19%, 34.71% resp. than that in alpine meadow. [Conclusion] The content of SOC and LFOC in artificial grasslands were slightly higher than that in alpine meadow and significantly higher than in farmlands. The total carbon-fixed amounts in plant-soil system in artificial grassland and alpine meadow were significantly higher than that in farmland.

Key words Land use; Alpine meadow; Soil organic carbon; Light fractions organic carbon

草地是陆地生态系统的主体类型, 全球总面积约为44.5亿hm², 其碳素贮量达761 Pg, 其中89.4%贮存在土壤中^[1]。随着人口增长及其对粮食需求的不断增加, 土地被大量地开垦为农田。草地开垦通常会引起土壤中有机碳的大量释放, 至1998年, 全球约660 Mhm²的草地开垦为农田, 导致碳贮量大量减少^[2]。由于土壤有机碳库容量巨大, 其较小变化即可影响到大气中CO₂的浓度, 进而影响全球气候变化。因此, 合理控制草地的土地利用方式, 尽可能减小其对气候变化的负面效应是目前草地利用研究的重点。青藏高原自第三纪隆升成为世界最高的高原以来, 就以其独特的自然地理单元影响着欧亚大陆的大气环流和各类生态系统的分布格局。青藏高原生态系统极其脆弱, 成为全球变化的最敏感区域和生物多样性重点保护区, 为世界科学界所关注。研究不同土地利用方式下高寒草甸生态系统土壤碳库的组成与变化, 对于准确评价青藏高原生物地球化学循环对全球变化响应和反馈作用具有重要的科学意义。笔者研究了高寒草甸在不同土地利用方式下土壤中有机碳及其组分的变化趋势, 旨在探讨土壤碳库的变化规律, 为高寒草甸的合理开发利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验地自然概况。试验样地设置在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)地区, 地处青藏高原东

北隅, 祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河河谷, 101°12'~101°23' E, 37°29'~37°45' N, 海拔3280 m, 属典型的高原大陆性气候, 年温差较小, 日温差较大。年平均气温-1.7, 最暖的7月平均气温9.8, 最冷的1月平均气温-14.8, 年平均降水量618 mm, 降水主要集中于暖季的5-9月, 占全年降水量的80%。植物生长季雨热同季。

1.1.2 试验地土壤利用状况。高寒矮高草草甸是青藏高原分布最广的植被类型之一, 属长期适应于高寒生态环境下形成的耐寒中生植物, 主要分布于山间滩地和偏阳坡。植物群落以矮高草(*Kobresia humilis*)、蔗草(*Scirpus dustigmatiscus*)、羊茅(*Festuca straminea*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、早熟禾(*Poa* sp.)、麻花苣(*Gentiana straminea*)、美丽凤毛菊(*Saussurea superba*)、雪白萎陵菜(*Potentilla nivea*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、雅毛茛(*Ranunculus pulchellus*)、高山唐松草(*Thalictrum alpinum*)、苔草(*Carex* sp.)、小嵩草(*Kobresia pygmaea*)、线叶龙胆(*Gentiana farreri*)等为建群种和优势种, 植株低矮、密集、覆盖度大, 初级生产力低。土壤为草毡寒冻锥形土, 土层浅薄, 有机质含量丰富。长期以来, 天然高寒草甸被逐渐开垦为人工草地和农田, 原生植被景观破碎化, 人工草地、农田镶嵌其中。该研究选择广泛分布于试验区平缓滩地上的原生高寒矮高草草甸、耕作20年的人工草地和油菜田为研究对象。其中, 原生高寒草甸为冬春季草场, 每年9月10日牧群迁入, 次年6月10日迁出; 人工草地以种植一年生牧草(燕麦)为主, 每年5月播种, 当年9月下旬收割, 每年在播种前使用小型农业机械进行土地翻耕; 农田主要种植春油菜, 每年5月上旬播种, 9月中旬收获, 秋收后即使用大型农业机械进行翻耕处理。不同土地利用方式土壤基本性状见表1。

基金项目 国家自然科学基金项目(40471133); 中国科学院知识创新工程重大项目——中国陆地和近海生态系统碳收支研究(KZCX1-SW-01); 中国科学院资源环境领域野外台站研究基金资助。

作者简介 李月梅(1974-), 女, 青海乐都人, 副研究员, 从事土壤生态方向的研究。* 通讯作者。

收稿日期 2008-02-01

1.2 方法

1.2.1 采样方法。2004年9月,在3种不同土地利用方式的地块中采用S形布点法,各样地布设5个取样点。采用土

壤剖面方式按0~10、10~20、20~30和30~40 cm采集土壤样品,同时用100 cm³环刀测定各土层土壤容重。土样风干,去除砾石等杂物后过2 mm筛备用。

表1 不同土地利用方式土壤基本理化性状及其植物-土壤系统碳素年固定量

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil under different land use types and their carbon annual fixed amount of plant-soil system

土地利用方式 Land use type	容重 Bulk density g/cm ³				有机碳 Organic carbon %				植物-土壤系统碳素年固定量 Carbon annual fixed amount of plant-soil system t/hm ²		
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	地上部分 根系	土壤	SOC年增量
高寒草甸 Alpine meadow	0.914 b	1.072 a	1.085 a	1.089 a	4.116 a	2.808 a	2.246 a	1.791 a	1.33 b	6.32 a	-
人工草地 Artificial grassland	0.893 b	1.032 a	1.088 a	1.124 a	3.790 a	3.119 a	2.224 a	1.709 a	4.69 a	2.55 b	0.12
农田 Farmland	1.155 a	1.196 a	1.195 a	1.184 a	1.790 b	2.419 a	1.952 a	1.954 a	4.10 a	0.52 c	-0.93

注:多重比较仅限于同一深度范围,同列数据后不同小写字母表示在0.05水平有差异。下同。

Note: The multiple comparison is limited in the same depth range. Different lowercases in a row mean significant differences at 0.05 level. The same as follows.

1.2.2 分析方法。土壤碳素用日本岛津公司生产的TOC-5000A有机碳分析仪进行测定,其中总碳(TC)、无机碳(IC)燃烧温度分别为900和250。土壤总有机碳(SOC)测定值由TC减去IC得出,轻组有机碳(LFOC)^[3-7]则由TC直接得出。

(1)土壤总有机碳。称取0.01~0.02 g过0.25 mm筛的土样,直接上机测定。利用测定结果,结合土壤容重和采样深度,计算单位面积的土壤总有机碳量。

(2)轻组有机碳。称取过2 mm筛的土样25 g于100 ml离心管中,加入比重为1.70 g/ml的NaI溶液,于200 r/min条件下振荡1 h,然后在4 000 r/min下离心15 min,将浮在液面的轻组移至装有0.45 μm尼龙滤纸的漏斗中抽气过滤,用50 ml浓度0.01 mol/L CaCl₂洗涤,再用蒸馏水洗后移到烧杯中,重复以上步骤,提取2次后将所提轻组混合,在60℃下烘干72 h,称重。计算烘干样品质量占总土壤样品的比例。研细后过60目筛。利用测定结果,结合土壤容重和采样深度,计算单位面积LFOC含量。

1.2.3 数据分析。所列数据均为平均值,图表示用Excel软件制作,用Spss11.5的ANOVA过程对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤SOC^[3]含量

2.1.1 不同土地利用方式对土壤SOC含量的影响。图1表明,0~40 cm土体中土壤SOC含量依次是人工草地>高寒草甸>农田,其含量分别为113.13、111.61、93.54 t/hm²。人工草地土壤中SOC含量与高寒草甸相比并未发生明显变化,反而高出1.36%,而农田土壤中SOC则较高寒草甸低16.19%。这说明高寒地区土地利用方式的不同也会对土壤碳库含量产生不同影响。分别对不同土层间SOC含量进行比较得出,在0~10 cm土层农田SOC含量最低,仅为21.02 t/hm²,与人工草地和农田间差异显著(P<0.05);在10~20、20~30和30~40 cm各土层,高寒草甸、人工草地和农田间SOC含量无明显差异。刘梦云等对宁南山区农田、天然草地和人工草地几种不同土地利用格局的土壤有机碳含量进行了研究,结果表明,在0~40 cm土层,土壤有机碳表现为天然草地>农田>人工草地^[4]。这与该研究中的结果相反,这种差异的产生可能与人工草地的利用方式、强度及其他因素有关。

2.1.2 不同土地利用方式下土壤SOC剖面分布的变化。高寒草甸、人工草地和农田土壤SOC含量的剖面垂直分布规律各有不同,但均具有较明显的层次性。在0~40 cm土体,高寒草甸随土层深度的增加,SOC含量逐渐下降,各土层

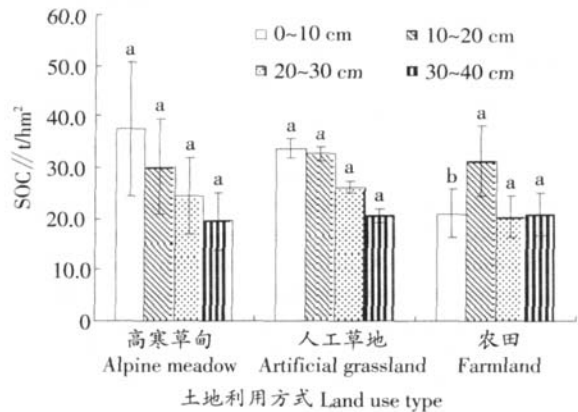


图1 不同土地利用方式土壤SOC含量变化
Fig. 1 Changes of the contents of soil total organic carbon under different land use types

(每层10 cm)SOC占整个40 cm土体SOC的比例分别为33.72%、26.97%、21.83%、17.47%。傅华等人对阿拉善主要草地类型的土壤有机碳分布特征进行了研究,认为高山草甸0~20 cm土层与20~40 cm土层间差异不显著,但高于40~60 cm土层^[5]。该研究结果略有差异,高寒草甸0~10 cm与10~20 cm土层间差异不显著,但与20~30、30~40 cm土层间均有显著差异(P<0.05)。人工草地与高寒草甸剖面变化趋势一致,随土层深度的增加,SOC含量呈下降趋势。开垦20年后,表层(0~10 cm)SOC含量下降了10.62%,而10~20、20~30、30~40 cm各层却都有所增加,分别增加了8.64%、7.20%、5.97%。农田SOC剖面分布则表现为10~20 cm土层含量最高,0~20、20~30、30~40 cm各土层与亚表层(10~20 cm)间差异显著(P<0.05)。

2.2 土壤LFOC含量

2.2.1 不同土地利用方式对土壤LFOC含量的影响。高寒草甸、人工草地和农田0~40 cm土层土壤LFOC含量的变化情况依次是人工草地>高寒草甸>农田(图2),其含量分别为10.36、8.93、5.83 t/hm²。两种不同的种植制度导致土壤LFOC含量产生不同的变化趋势,人工草地土壤中LFOC含量高出高寒草甸16.01%,与SOC的变化相比快11.77倍。种植春油菜的农田土壤中LFOC则较高寒草甸低34.71%,较SOC变化快2.14倍。比较不同土层LFOC含量可知,在0~10 cm土层,高寒草甸和人工草地LFOC含量较高,且两者间无明显差异,但均与农田间存在显著差异(P<0.05);在10~20 cm土层,人工草地含量最高,高寒草甸最低,两种土地利用方式间差异显著(P<0.05),农田与两者间均无明显

差异;在 20~30 cm 土层,3 种土地利用方式间 LFOC 含量相近,均无明显差异;在 30~40 cm 土层,人工草地 LFOC 含量最高,其次为高寒草甸,农田最低。人工草地与农田间差异显著($P<0.05$),与高寒草甸间则无显著差异。

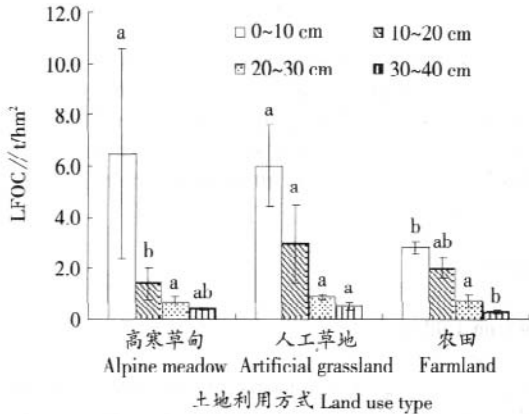


图 2 不同土地利用方式土壤 LFOC 含量变化

Fig. 2 Changes of soil LFOC contents under different land use types

2.2.2 不同土地利用方式对土壤 LFOC 剖面分布的影响。3 种土地利用方式下土壤 LFOC 含量均具有较明显的层次性分布规律。高寒草甸、人工草地和农田随土层深度的增加, LFOC 含量均呈下降趋势,即 $0\sim10\text{ cm} > 10\sim20\text{ cm} > 20\sim30\text{ cm} > 30\sim40\text{ cm}$ 。高寒草甸中,各土层(每层 10 cm)LFOC 占整个 40 cm 土体 SOC 的比例分别为 72.49%、15.58%、7.44%、4.49%,可以看出 LFOC 主要分布在植物根系分布较多的 0~20 cm 土层中,并且 0~10 cm 土层中 LFOC 含量与其他土层间差异均达显著水平($P<0.05$)。人工草地中表层(0~10 cm) LFOC 较未开垦的高寒草甸相比低 10.62%,而在同样开垦年限的农田中,表层(0~10 cm)LFOC 含量则较高寒草甸低 57.96%。人工草地、农田中下层土壤的 LFOC 含量则有不同程度的增加,这是由于耕作打乱了土壤剖面的天然分布层次,将原本主要分布在表层土壤中的 LFOC 混合后不均匀地分散到了耕作所能触及的各个土层。

2.2.3 不同土地利用方式下土壤 LFOC 分配比例的变化。图 3 表明,高寒草甸、人工草地和农田的 0~40 cm 土体中,其 LFOC 分配比例顺序为人工草地 > 高寒草甸 > 农田。由底层向表层,高寒草甸 LFOC 分配比例在 2.18%~17.21%,人工草地在 2.36%~17.89%,农田中则在 1.47%~13.06%。这主要是由于不同作物的根系分布不同以及土壤中有机碳本底含量差异造成的。比较 0~40 cm 土体内 LFOC 分配比例,各土层中 3 种土地利用方式间均无明显差异。3 种土地利用方式下, LFOC 分配比例在土壤剖面中的分布规律均表现为随着土层深度的增加,分配比例逐渐减小。吴建国等对六盘山林区林地、林地开垦后形成的农田和牧草地的土壤活性有机碳进行研究后认为,以上 3 种土地利用方式中,土壤 LFOC 分配比例和含量均随土层的加深而递减^[9],这与该研究结果相同。

2.3 不同土地利用方式下植物-土壤系统碳固定量的变化 表 1 表明,高寒草甸中植物地上部分年固定碳量最低,仅为 1.33 t/(hm²·年),根系中最高,为 6.32 t/(hm²·年);人工草地中植物地上部分和根系的年固定碳量分别为 4.69、2.55 t/(hm²·年);而农田中则主要种植油菜,其地上部分年固定碳量 4.10 t/hm²,但根系年固定碳量最低,仅为 0.52 t/hm²。

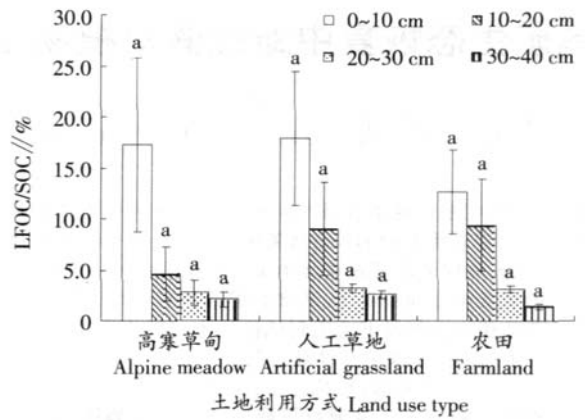


图 3 不同土地利用方式土壤 LFOC 分配比例

Fig. 3 Changes of soil LFOC distribution under different land use types

高寒草甸开垦后种植不同作物,其土壤碳库的年变化量:人工草地年增量为 0.08 t/hm²^[7],农田为 -0.93 t/(hm²·年)^[8]。综合分析后得出,人工草地和高寒草甸的植物-土壤系统碳总固定量明显高于农田(油菜地)。

3 讨论

(1)许多研究表明,自然植被开垦后一般会导致土壤有机碳含量的下降^[9-11]。但也有研究表明,草甸土开垦为农田后土壤有机碳贮量会有所增加^[12-13]。

(2)高寒草甸作为高寒草甸生态系统的主要植被类型,能通过光合作用吸收和固定大气中的 CO₂,是一个重要的碳汇^[14-19]。随着人类活动的不断加剧,高寒草甸的原有土地利用方式发生了变化,从而影响了土壤碳库中有机碳的分布,但人类活动强度不是影响土壤中有机碳含量的唯一因素,作为土壤有机碳的主要补充来源,每年进入周转的植物根系碳量也是一个值得考虑的主要因素。

(3)人类干扰相对较轻的高寒草甸土壤中有机碳含量较高,主要由于其根系生物量高,按根系年周转率 0.319 3 计算^[20],每年向土壤中补充有机碳 2.02 t/hm²。人工草地和农田是两种受人类活动影响较强的土地利用方式,人工草地土壤中 SOC 和 LFOC 含量则较高寒草甸略有增加,究其原因在于虽然其根系输入量较之高寒草甸明显下降,但人工草地在秋季收割后根系全部被遗留在土壤中长达数月(当年 9 月至次年 5 月),每年约有 2.55 t/hm² 碳被输入土壤,有效补充了土壤碳库,使土壤碳库依然保持了碳汇功能^[7]。而农田土壤碳库中总 SOC 和 LFOC 含量较高寒草甸明显降低,这主要是由于输入土壤碳库的根系生物量骤然减小所致,虽有少量根系补充,但在长期耕作条件下,作物收获后立即进行秋季翻耕,风化、风蚀等因素加剧了土壤有机碳含量下降,导致土壤碳库由碳汇逆转为碳源^[8]。此外,从农田收获后的作物秸秆多被作为燃料燃烧,初级生产所固定的碳量绝大部分排放到大气中,极大地降低了高寒草地作为碳汇的功能。

参考文献

[1] ATJAY G L, KETNER P, DUVIGEAUD P. Terrestrial primary production and phytomas [M]. BOLIN B, DEGENS E T, KEMPEEDS S. The global carbon cycle scope 13. Chichester: John Wiley & Sons, 1979: 129-181.
 [2] LAL R, KIMBLE J, FOLLETT R, eds. Land use and soil C pool in terrestrial ecosystems[M]. LAL R, et al, eds. Management of carbon (下转第 6010 页)

导致林地数量在2004年有所增加,未利用土地数量也在2000年后减少,这些政策是推动土地利用朝着良性发展的主要原因。

2.2.3 经济因素。1988~2000年宝鸡市经济快速发展,已经跻身中国综合实力百强城市,经济整体实力迈上了一个大台阶,宝鸡市国民生产总值增长翻了3番,城镇居民人均收入提高了5倍多,农村居民人均收入提高了4倍。经济的快速发展,使区域的产业结构不断调整,同时使得农业内部结构发生变化,最终必然反映到土地利用结构的变化上。市场经济条件下,由于受经济利益的驱动,土地资源总是由低值产业向高值产业转移,农业产业结构调整加快,蔬菜果品花卉等高附加值农产品得到大力发展,加上农户长期或季节性到外地打工导致耕地抛荒撂荒,使耕地数量减少,园地数量增加,此外大量砍伐林木或开垦等不合理的人类经济活动导致林地减少,未利用土地增加。

2.2.4 城市化因素。引起土地利用变化的另一重要驱动力是城市化。经济的发展和城市化速度的加快,使工业企业数量不断增加,城市规模不断扩大,这必然导致工矿企业、城市建设及交通用地需求不断增加,同时要占用大量的耕地等其他地类。随着西部大开发政策的实施,该区城市化进程在加快,城市建设及城市规模有了很大发展,城市用地不断增加,同时农村建设也占用了耕地。宝鸡市发展目标是把宝鸡市建成工业强市、畜牧大市、旅游名市和百万人口的现代化生态园林城市。围绕发展目标宝鸡市城市建设飞速发展,金台区是宝鸡市旧城区所在地,旧城改造日新月异,城市综合服务功能不断增强,新区开发前景广阔,东部新区是宝鸡市规划的行政中心区,市政府及各机关即将入驻,区内依托关中高新技术产业开发带和宝鸡高新技术开发区已规划建设成的金台科技园,是客商投资热土。渭滨区科技经济优势明

显,是国家级星火技术密集区,区内有国家级宝鸡高新技术开发区,开发区东区正在筹建之中。这充分说明了宝鸡市金渭两区居民点及工矿用地的增长与城市化的速度加快密不可分。

3 结论

综上所述,在1988~2004年,研究区域土地利用的基本特征表现为:耕地面积持续减少,减少速度最快;园地和居民工矿用地持续增加,其中园地增加速度最快;林地和未利用地呈现波动变化,在1988~2000年林地面积锐减,主要转化为未利用地,导致未利用地数量增加,在2000~2004年林地面积有所增加,主要由耕地和未利用地转化而来,导致未利用地数量减少;水域面积变化不大,略有增加。因此在以后的土地资源开发利用中,应充分合理地利用有限的土地资源,保护土地资源,以实现资源的可持续利用。

参考文献

- 李秀彬. 全球环境变化研究核心——土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996, 51(6): 553-557.
- 陈佑启, 杨鹏. 国际上土地利用/土地覆盖研究的新进展[J]. 经济地理, 2001, 21(1): 95-100.
- 柳海鹰, 高吉喜, 李政海. 土地覆盖及土地利用遥感研究进展[J]. 国土资源遥感, 2001, (4): 7-12.
- 吴泉源, 侯志华, 于竹洲, 等. 龙口市海岸带土地利用动态变化分析[J]. 地理研究, 2006, 25(5): 921-929.
- 史培军, 陈晋, 潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析[J]. 地理学报, 2000, 55(2): 151-160.
- 王思远, 张增祥, 周全斌, 等. 基于遥感和GIS技术的土地利用时空特征研究[J]. 遥感学报, 2002, 6(3): 223-228.
- 全斌, 朱鹤健, 陈松林. 基于GIS和RS的晋江市土地利用变化与可持续利用研究[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 423-428.
- 曹雪, 柯长青. 基于TM影像的南京市土地利用遥感动态监测[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(11): 958-961.
- 黄钱, 赵智杰, 蒋美文. 塔里木河下游垦区土地利用/覆盖动态变化过程分析[J]. 干旱区地理, 2006, 29(6): 894-901.
- BLAIR G J, LEFROY R D B, SINGH B P, et al. Development and use of carbon management index to monitor changes in soil C pool size and turnover rate [M]. CADISCH G, GILLER K E eds. Drive by nature plant litter quality and decomposition. Wallingford: CAB International, 1997: 273-281.
- 陈伏生, 曾德慧, 陈广生, 等. 开垦对草甸土有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 413-419.
- 曹广民, 李英年, 张金霞, 等. 环境因子对暗沃寒冻锥形土土壤CO₂释放速率的影响[J]. 草地学报, 2001, 9(4): 307-312.
- 曹广民, 张金霞, 赵新全, 等. 草毡寒冻锥形土土壤CO₂释放量估测方法初探[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 261-267.
- 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 草毡寒冻锥形土CO₂释放特征[J]. 生态学报, 2001, 21(4): 544-549.
- 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 退化草地暗沃寒冻锥形土CO₂释放的日变化和季节变化动态[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 32-39.
- 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 高寒矮蒿草甸大气-土壤-植被-动物系统碳素储量及碳素循环[J]. 生态学报, 2003, 123(4): 627-634.
- 周党卫, 曹广民, 张金霞, 等. 植物生长季退化草毡寒冻锥形土CO₂释放特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 367-371.
- 蒲继延, 李英年, 赵亮, 等. 矮蒿草甸生物量季节动态及其与气候因子的关系[J]. 草地学报, 2005, 13(3): 238-241.

(上接第5953页)

- sequestration in soil. Boca Raton, CRC Press, 1998: 1-10.
- 张金霞, 宋长春. 土地利用方式对土壤碳库影响的敏感性评价指标[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 500-504.
 - 刘梦云, 安韶山, 常庆瑞. 宁南山区不同土地利用方式土壤质量评价[J]. 水土保持研究, 2005, 12(3): 47-49.
 - 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 等. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2004, 24(3): 469-476.
 - 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(5): 657-664.
 - 李月梅, 王跃思, 曹广民, 等. 开垦对高寒草甸土壤有机碳影响的初步研究[J]. 地理科学进展, 2005, 24(6): 59-65.
 - 李月梅, 曹广民, 王跃思. 开垦对高寒草甸土壤有机碳的影响[J]. 生态学报, 2006, 25(8): 911-915.
 - AGUILAR R, KELLY E F, HEIL R D. Effects of cultivation on soils in northern Great Plains rangeland [J]. Soil Sci Soc Am J, 1988, 52: 1081-1085.
 - DAVIDSON E A, ACKERMAN I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils [J]. Biogeochemistry, 1993, 20: 161-193.
 - TIESSEN H J, STEWARD W B, BETTANY J R. Cultivation effects on the amount and concentration of carbon, nitrogen and phosphorus in grassland soil [J]. Agronomy Journal, 1982, 74: 831.