

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

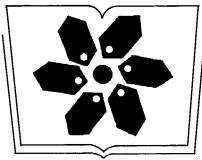
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第12期 Vol.32 No.12 **2012**

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 32 卷 第 12 期

2012 年 6 月 (半月刊)

目 次

- 河口湿地人为干扰度时空动态及景观响应——以大洋河口为例..... 孙永光,赵冬至,吴 涛,等 (3645)
- 鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征..... 张全军,于秀波,钱建鑫,等 (3656)
- 青岛市湿地生态网络评价与构建..... 傅 强,宋 军,毛 锋,等 (3670)
- 大堤型湖滨带生态系统健康状态驱动因子——以太湖为例..... 叶 春,李春华,王秋光,等 (3681)
- 绿色屋顶径流氮磷浓度分布及赋存形态..... 王书敏,何 强,张峻华,等 (3691)
- 坡度对农田土壤动物群落结构及多样性的影响..... 何先进,吴鹏飞,崔丽巍,等 (3701)
- 枣园桃蛀果蛾寄生蜂种类及其与寄主的关系..... 姚艳霞,赵文霞,常聚普,等 (3714)
- 基于逻辑斯蒂回归模型的鹭科水鸟栖息地适宜性评价..... 邹丽丽,陈晓翔,何 莹,等 (3722)
- 温度、盐度和 pH 对马氏珠母贝稚贝清滤率的联合效应 朱晓闻,王 辉,刘 进,等 (3729)
- 鸡桑药共生模式库区土壤养分变化及流失风险..... 赵丽平,杨贵明,赵同科,等 (3737)
- 黑河中游典型土地利用方式下土壤粒径分布及与有机碳的关系 张俊华,李国栋,南忠仁 (3745)
- DEM 栅格分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响 邱临静,郑粉莉,Yin Runsheng (3754)
- 粒度变化对城市热岛空间格局分析的影响..... 郭冠华,陈颖彪,魏建兵,等 (3764)
- 基于景观连接度的森林景观恢复研究——以巩义市为例 陈 杰,梁国付,丁圣彦 (3773)
- 城市能源利用碳足迹分析——以厦门市为例..... 林剑艺,孟凡鑫,崔胜辉,等 (3782)
- 高寒牧区村域生态足迹——以甘南州合作市为例..... 王录仓,高 静 (3795)
- 太湖湖滨带生态系统健康评价..... 李春华,叶 春,赵晓峰,等 (3806)
- 秦岭大熊猫栖息地巴山木竹生物量..... 党坤良,陈俊娴,孙飞翔,等 (3816)
- 盐胁迫对盐生植物黄花补血草种子萌发和幼苗生长的影响..... 尤 佳,王文瑞,卢 金,等 (3825)
- 海南霸王岭山地原始林与伐后林中木质藤本对支持木的选择..... 刘晋仙,陶建平,何 泽,等 (3834)
- 闽楠幼树光合特性及生物量分配对光环境的响应..... 王振兴,朱锦懋,王 健,等 (3841)
- 基于形态及分子标记的濒危植物夏蜡梅自然居群的遗传变异研究 金则新,顾婧婧,李钧敏 (3849)
- 不同径级油松径向生长对气候的响应..... 姜庆彪,赵秀海,高露双,等 (3859)
- 珍稀濒危植物长蕊木兰种群的年龄结构与空间分布..... 袁春明,孟广涛,方向京,等 (3866)
- 巨桉与 5 种木本植物幼树的耗水特性及水分利用效率的比较..... 胡红玲,张 健,万雪琴,等 (3873)
- 银木凋落叶腐解过程对小白菜生长和抗性生理的影响..... 黄激激,胡庭兴,张念念,等 (3883)
- 基于氡示踪剂和热扩散技术的栓皮栎水分运输速率与效率研究..... 孙守家,孟 平,张劲松,等 (3892)
- 石漠化干旱环境中石生藓类水分吸收特征及其结构适应性..... 张显强,曾建军,湛金吾,等 (3902)
- 含铜有机肥对土壤酶活性和微生物群落代谢的影响..... 陈 琳,谷 洁,高 华,等 (3912)
- 钝叶枥不同性别花的花部形态与传粉特征比较..... 王 茜,邓洪平,丁 博,等 (3921)
- 我国春玉米潜在种植分布区的气候适宜性..... 何奇瑾,周广胜 (3931)
- 烯效唑干拌种对小麦氮素积累和运转及籽粒蛋白质品质的影响..... 樊高琼,杨恩年,郑 亭,等 (3940)

专论与综述

- 中国产业共生发展模式的国际比较及对策 石 磊,刘果果,郭思平 (3950)

研究简报

- 吉林省镇赉县近 10 年景观格局变化 张国坤,卢京花,宋开山,等 (3958)
- 杨树人工林生态系统通量贡献区分析..... 金 莹,张志强,方显瑞,等 (3966)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 330 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-06



封面图说: 鸳鸯——在分类上属雁形目,鸭科。英文名为 Mandarin Duck(即“中国官鸭”)。鸳指雄鸟,鸯指雌鸟,故鸳鸯属合成词。常常栖息于山地河谷、溪流、湖泊、水田等处,雌雄偶居,以植物性食物为主,也食昆虫等小动物。繁殖期 4—9 月间,雌雄配对后迁至营巢区。巢往往置于树洞中,用干草和绒羽铺垫,每窝产卵 7—12 枚。江西省婺源鸳鸯湖是亚洲最大的野生鸳鸯越冬栖息地。鸳鸯是一种美丽的禽鸟,中国传统文化又赋予它很多美好的寓意,因此,在许多文学艺术作品中经常用以表达爱情。

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

DOI: 10.5846/stxb201110091473

张俊华, 李国栋, 南忠仁. 黑河中游典型土地利用方式下土壤粒径分布及与有机碳的关系. 生态学报, 2012, 32(12): 3745-3753.

Zhang J H, Li G D, Nan Z R. Soil particle size distribution and its relationship with soil organic carbons under different land uses in the middle of Heihe river. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3745-3753.

黑河中游典型土地利用方式下土壤粒径分布 及与有机碳的关系

张俊华^{1,2}, 李国栋^{1,2,*}, 南忠仁³

(1. 河南大学资源与环境研究所, 开封 475000; 2. 河南大学环境与规划学院, 开封 475000;

3. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 730000)

摘要:土地利用方式是影响土壤粒径分布、土壤有机碳及其组成含量的重要因素。研究显示:黑河中游典型土地利用类型下,不同土壤粒径分布和土壤总有机碳(TOC)、活性有机碳(AOC)、非活性有机碳(NOC)的含量存在差异。剖面上 TOC、AOC、NOC 含量较高的旱地、水田、中覆盖度草地与含量较低的戈壁、裸土地、沙地、盐碱地相比, <1 μm 、1—5 μm 、5—10 μm 、10—50 μm 的粒径含量较高, 而 50—250 μm 、250—1000 μm 的含量较低, 这种变化以 50 μm 为分界, 分析表明 <50 μm 的粉粒和粘粒可起到固碳作用, 而 50—250 μm 、250—1000 μm 的砂粒起碳损失作用。统计结果表明, 以 50 μm 为分界, 水田、戈壁、中覆盖度草地剖面上 TOC、AOC、NOC 与 1—5 μm 、5—10 μm 、10—50 μm 呈正相关, 与 50—250 μm 、250—1000 μm 呈负相关。分析发现, 粉粒和粘粒与土壤 TOC、AOC、NOC 的关系较显著, 是影响和控制团聚体形成和稳定的重要因素。增加地表植被覆盖度、退化生态系统的植被恢复、农田耕种、防风固沙措施是提高土壤有机碳、粘粒和粉粒含量的方式, 也为土壤团聚体的形成和稳定提供基础。

关键词:土地利用; 土壤粒径分布; 土壤有机碳; 黑河

Soil particle size distribution and its relationship with soil organic carbons under different land uses in the middle of Heihe river

ZHANG Junhua^{1,2}, LI Guodong^{1,2,*}, NAN Zhongren³

1 Institute of Natural Resources and Environmental Science Research, Henan University, Kaifeng 475000, China

2 College of Environment and Planning of Henan University, Kaifeng 475000, China

3 College of Resource and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Land use plays an important role in soil particle size distribution, soil organic carbon (SOC) and its components. Based on the methods of field sampling, laboratory analysis and statistical analysis, soil particle size distribution and its relationship with SOC under different land uses are researched in the middle of Heihe river, which locates in *Hexi* corridor, *Gansu* province. We sampled the soil down to 100 cm in depth with interval of 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm and 80—100 cm. Distribution of particle size under different land uses shows that percentage of the particle size <1, 1—5, 5—10 and 10—50 μm for paddy field, dry land, nakedness land and middle density grassland are higher than those of the saline-alkali field, sandlot and desert, but percentage of the size 50—250, 250—1000 and 1000—3000 μm are inverse. In soil profile, average total organic carbon (TOC), active organic carbon (AOC) and nonactive organic carbon (NOC) contents for different land uses vary respectively with a range of 0.11%—2.46%, 0.06%—0.78% and 0.05%—1.68%, it is higher in the topsoil (0—20 cm) compared to that in the low depths (20—100 cm), also TOC, AOC

基金项目:国家自然科学基金项目(41101088); 中国科学院知识创新重大项目(KZCX1-09); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(12A170002)

收稿日期:2011-10-09; **修订日期:**2012-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: oklkd@163.com

and NOC content gradually decline with the incremental depth. Results show soil particle size distribution and content of TOC, AOC and NOC have difference under different land uses. In the soil profile, average TOC, AOC and NOC contents are higher in dry land, paddy field and middle density grassland than in the desert, nakedness land, sandlot and saline-alkali field. The trends of soil particle size and SOC (TOC, AOC and NOC) have the similarities and differences, the similarities is percentage of particles <1, 1—5, 5—10 and 10—50 in dry land, paddy field and middle density grassland that have high SOC (TOC, AOC and NOC) are higher than that in desert, nakedness land, sandlot and saline-alkali field that have low SOC, but the situation is opposite for particles 50—250 and 250—1000, the dividing point is 50. It is found that soil particle size under 50 μm play a role in carbon sequestration and soil particle size surpass 50 μm play a role in carbon loss. Statistics analysis show that SOC (TOC, AOC and NOC) in paddy field, desert and the middle density grassland have significant positive ($P < 0.01$ or $P < 0.05$) correlation with soil silt— and clay—size fractions under 50 μm size and significant negative relation ($P < 0.01$ or $P < 0.05$) with sand fractions surpass 50 μm size. The result show silt— and clay—size fractions play a major role in the formation and stabilization of soil aggregates. Measures of increasing vegetation coverage, vegetation restoration of degraded ecosystems, tillage, wind—break and sand—fixing can enhance content of SOC, silt— and clay—size fractions, and further provide foundation and stability for soil aggregates formation.

Key Words: land use; soil particle size distribution; soil organic carbon; Heihe river

土地利用方式是影响土壤有机碳含量及团聚体稳定性的重要因素,研究表明,土地利用变化即可成为土壤有机碳减少的途径^[1-2],同时,也是有机碳增加的有效方式^[3-4]。而土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,是粘粒与有机质互相作用的结果,团聚体的形成与稳定对土壤有机碳含量具有一定的保护作用^[5-6],而有机碳含量的高低也是团聚体稳定的基础和关键因素。对于旱区农田的研究表明,土壤中粘粒和粉粒对团聚体的形成作用大于有机碳,而有机碳对团聚体稳定性影响较粘粒和粉粒更明显^[7]。故而,土地利用方式的不同引起有机碳含量的改变将波及其与不同土壤粒径形成的团聚体的数量和稳定性。土壤中有有机碳的组分复杂,其中,应用不同方法对活性有机碳的研究鲜有报道,因实验方法不同、各有各的侧重点和代表意义,对活性有机碳的研究较难达到统一,因活性有机碳存在的诸多问题,对有机碳中非活性有机碳部分的界定更没有一定的标准可循,有关活性有机碳、非活性有机碳与粒径关系的研究成果较少见。当土地利用方式发生变化,土壤团聚体组成及其稳定性受到影响并改变,总有机碳、活性有机碳、非活性有机碳含量的变化以及三类有机碳与土壤粒径关系如何变化,对这一方面开展工作有助于了解土壤有机碳的变化机制和土壤固碳机理。

黑河是我国西北地区第二大内陆河,因水资源短缺、人口增加、生态环境恶化等诸多问题,区内土地利用方式变化剧烈。王根绪等认为,黑河流域呈现出以灌溉耕地急剧增加带动的人口绿洲系统扩张和天然草地的减少、原有河道大量废弃为代表的天然绿洲体系的萎缩^[8]。而土地耕种利用是现阶段中游地区最主要的土地利用变化形式^[9]。耕地变化驱动着中游地区不同土地利用类型之间发生相互转化,表现在耕地、城镇用地增加,草地、未利用地的急剧减少^[10-12]。另外,沙漠化是驱动中游土地利用类型变化的另一个因素^[13-14]。结合实地调查、前期成果及现状 15 种土地利用类型,去除水域(水库和坑塘、河渠、湖泊)、祁连山前高海拔寒区不利于农业生产的高覆盖度草地(面积占 0.34%)、合黎山—龙首山山前裸岩石砾地、面积较小的有林地和灌木林地、城镇用地几类土地利用类型,选取黑河中游易发生变化、且对土壤有机碳含量有影响的戈壁、旱地、裸土地、沙地、水田、盐碱地、中覆盖度草地土地利用类型,引入有机碳中的活性有机碳、非活性有机碳两个指标,分析土地利用方式对土壤粒径分布的影响,探讨土壤粒径与土壤总有机碳、活性有机碳、非活性有机碳之间的关系,揭示土壤有机碳的变化机制和土壤固碳机理,为稳定和提高干旱绿洲区土壤有机碳的储量提供参考和依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

黑河流域介于 37°45′—42°40′N, 97°05′—102°00′E 之间,研究区为中游地区,包括酒泉盆地、张掖盆地、

民乐一大马营盆地,土地面积 $2.56 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中戈壁沙漠占 31%,土质滩地占 29%,绿洲占 24%,低山丘陵占 16%,属于灌溉绿洲农业区。因深居大陆腹地,干旱少雨。中部走廊平原区气候水平变化具有明显的东西差异和南北差异,降水量由东部向西递减,蒸发量则由东向西递增。农作物以小麦、玉米、豆类、油菜、棉花等为主。因水热条件的关系,自然植被在水平分布上自东南向西北大体为灌丛、草原、荒漠植被带,呈现出逐渐荒漠化的带间分布。近年,因人口数量的增加、农业的发展及下游生态用水量的急增,加剧了中游绿洲系统内人、水资源、土地、生态环境之间的矛盾。

1.2 研究方法

采用网格法($12 \text{ km} \times 12 \text{ km}$)和实地调查相结合布设取样点。以 1:10 万的地形图为准,在图上标注出采样点的分布位置。实地取样过程中,依据路况、达到的难易程度、土地利用类型的分布、土壤剖面上土层薄厚、种植方式等情况,增加和减少采样点。最终,获得的采样点数为:中覆盖度草地 13 个、盐碱地 5 个、水田 38 个、旱地 5 个、沙地 10 个、戈壁 11 个、裸土地 5 个。实地取样中,因沙地剖面呈现出均质化或沙层深度浅等特点,采样多集中在表层 0—20 cm,完整的剖面样品采样点仅 4 个。

土壤剖面上的取样深度 100 cm,按 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm 间隔取样。土壤样品在室内进行风干、过筛后,进行总有机碳(TOC)、活性有机碳(AOC)、非活性有机碳(NOC)的测定。用 GPS 测定采样点的地理坐标。TOC 含量采用油浴加热- $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 容量法^[15];AOC 采用高锰酸钾氧化法^[16]。NOC 的含量是土壤中总有机碳含量与活性有机碳含量的差值。土壤颗粒百分含量采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定,实验过程为:取样 0.5 g,加入 10 mL 浓度为 10% H_2O_2 ,在加热板上加热使其充分反应去除样品中的有机质,待有机碳充分氧化完全,再加入 10% 的 HCl 并煮沸使其充分反应除去碳酸钙。将烧杯中盛满蒸馏水并静置一夜,抽去上层清液,加入 10 mL 浓度为 0.05 mol/L 的六偏磷酸钠分散剂,并用超声波清洗机振荡 10 min 后使用 Mastersizer 2000 粒度仪进行测量。依据中国科学院南京土壤研究所和西北水土保持研究所拟定的中国制土壤粒级划分标准,得到不同粒径百分含量。

2 结果与讨论

2.1 不同土地利用方式下土壤颗粒的粒径分布

分析发现,0—100 cm 深度,同一土地利用类型的不同采样点,同一粒径的百分含量差异较大,而同一个采样点,同一粒径的土壤颗粒含量差异相对小,这源于同一采样点土壤剖面上各层次母质来源和质地相同。0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm 深度,分别对旱地、水田、盐碱地、沙地、戈壁、裸土地、中覆盖度草地土壤颗粒的粒径平均含量分布作图,不同土地利用方式下土壤颗粒的含量变化趋势与 100 cm 深度不同土壤粒径的平均百分含量变化基本一致,但每层土壤颗粒粒径含量不同。因此,对同一土地利用类型下所有采样点 100 cm 深度不同土壤粒径的平均百分含量作图来代表剖面上土壤颗粒的变化趋势(图 1)。

如图所示,粒径 $<1 \mu\text{m}$ 、 $1—5 \mu\text{m}$ 、 $5—10 \mu\text{m}$ 、 $10—50 \mu\text{m}$ 、 $50—250 \mu\text{m}$ 、 $250—1000 \mu\text{m}$ 、 $1000—3000 \mu\text{m}$ 的含量分布在 1.309%—4.117%、5.468%—16.416%、3.756%—13.665%、11.273%—42.054%、17.046%—56.601%、6.296%—19.508%、0.115%—2.083%。几类土地利用类型中, $10—50 \mu\text{m}$ 、 $50—250 \mu\text{m}$ 的粒径含量偏高,二者所占比例在 56%—67% 之间。而 $<1 \mu\text{m}$ 、 $1—5 \mu\text{m}$ 、 $5—10 \mu\text{m}$ 、 $250—1000 \mu\text{m}$ 、 $1000—3000 \mu\text{m}$ 的含量略低,所占比例在 40% 左右。统计结果显示:不同土地利用类型下,0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm 深度, $<1 \mu\text{m}$ 、 $1—5 \mu\text{m}$ 、 $5—10 \mu\text{m}$ 、 $1000—3000 \mu\text{m}$ 的土壤颗粒因含量低,变幅小,标准差在 0.96—4.68 之间;而 $10—50 \mu\text{m}$ 、 $50—250 \mu\text{m}$ 、 $250—1000 \mu\text{m}$ 的土壤颗粒含量略高,变幅大,标准差在 6.75—14.99 之间。同一土地利用类型, $<1 \mu\text{m}$ 、 $1—5 \mu\text{m}$ 、 $5—10 \mu\text{m}$ 、 $1000—3000 \mu\text{m}$ 土壤颗粒的标准差也低于 $10—50 \mu\text{m}$ 、 $50—250 \mu\text{m}$ 、 $250—1000 \mu\text{m}$ 。

相对而言,水田、旱地、裸土地、中覆盖度草地中 $<1 \mu\text{m}$ 、 $1—5 \mu\text{m}$ 、 $5—10 \mu\text{m}$ 、 $10—50 \mu\text{m}$ 的粒径含量明显高于盐碱地、沙地、戈壁,而水田、旱地、裸土地、中覆盖度草地中 $50—250 \mu\text{m}$ 、 $250—1000 \mu\text{m}$ 、 $1000—3000 \mu\text{m}$

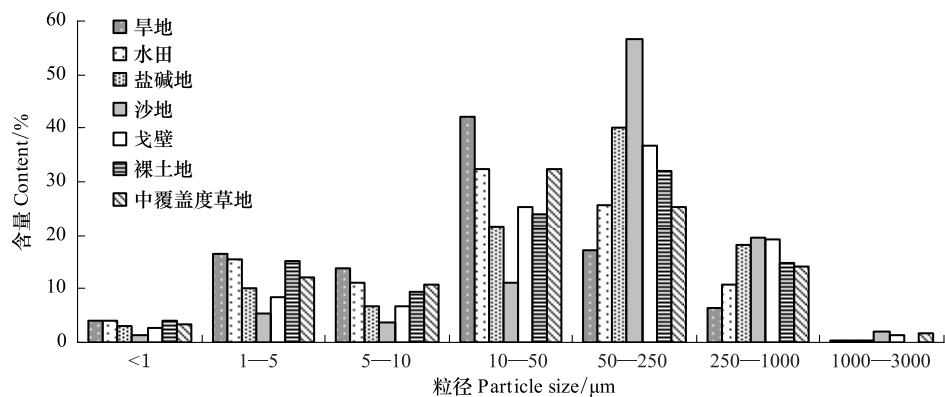


图1 不同土地利用类型土壤粒径的含量分布

Fig.1 Percentage distribution of particle size under different land uses

的粒径含量低于盐碱地、沙地、戈壁。

2.2 不同土地利用方式下土壤有机碳的含量分布

不同土地利用方式剖面上 TOC、AOC、NOC 的平均含量分别为 0.11%—2.46%、0.06%—0.78%、0.05%—1.68%，表层 0—20 cm 的含量明显高于深层，随深度增加，含量降低（表 1）。对每一种土地利用类型，剖面上表层 0—20 cm、20—40 cm 与 60—100 cm 深度相比，TOC、AOC、NOC 的变化幅度大，标准差大，最大值和最小值均高于深层 60—100 cm。旱地、水田与其他土地利用类型相比，不同深度 TOC、AOC、NOC 的平均含量高、标准差大（水田和旱地在 0.11—1.44 之间，其余土地利用类型在 0.008—0.27 之间）。对每一种土地利用类型，不同深度内 AOC、NOC 的平均含量、极值、标准差均低于 TOC。

表1 不同土地利用类型剖面上有机碳的平均含量/%
Table 1 Average soil organic carbon content in different land uses in 0—100 cm

土层深度/cm Depth	类型 Type	旱地 Dry land	水田 Paddy field	盐碱地 Saline—alkali field	沙地 Sandlot	戈壁 Desert	裸土地 Nakedness land	中覆盖度草地 Middle density grassland
0—20	TOC	2.46	1.09	0.69	0.17	0.50	0.58	0.84
	AOC	0.78	0.39	0.38	0.08	0.23	0.23	0.29
	NOC	1.68	0.70	0.31	0.09	0.27	0.35	0.55
20—40	TOC	1.88	0.78	0.57	0.15	0.39	0.37	0.56
	AOC	0.62	0.34	0.26	0.08	0.17	0.25	0.24
	NOC	1.26	0.44	0.31	0.07	0.22	0.12	0.32
40—60	TOC	1.26	0.55	0.44	0.12	0.29	0.30	0.41
	AOC	0.48	0.27	0.19	0.07	0.17	0.25	0.23
	NOC	0.78	0.28	0.25	0.05	0.12	0.05	0.18
60—80	TOC	1.40	0.53	0.24	0.11	0.29	0.27	0.39
	AOC	0.56	0.27	0.15	0.07	0.15	0.14	0.21
	NOC	0.84	0.26	0.09	0.04	0.14	0.13	0.18
80—100	TOC	1.26	0.50	0.25	0.11	0.24	0.34	0.33
	AOC	0.49	0.25	0.16	0.06	0.16	0.13	0.18
	NOC	0.77	0.25	0.09	0.05	0.08	0.21	0.15

剖面上，旱地土壤 TOC、AOC、NOC 的含量均高于其他土地利用类型，水田是区内广泛分布的农田土地利用类型，TOC、AOC、NOC 的含量低于旱地，而高于其他类型。沙地中 TOC、AOC、NOC 的含量均低于其他土地利用类型，盐碱地、戈壁、裸土地、中覆盖度草地中三类有机碳的含量则居于沙地与旱地、水田之间。从剖面 TOC、AOC、NOC 的含量，可分为三类：第一，受人类活动作用强的旱地和水田，有机碳含量较高。第二，盐碱

地、沙地、戈壁、裸土地是有机碳含量较低的土地类型,因地表自然植被覆盖度低,土地退化、沙漠化趋势严重。第三,中覆盖度草地土壤有机碳含量介于以上两者之间,因自然植被覆盖较高,土壤有机碳含量相对高的一类土地类型。

2.3 不同土地利用方式下土壤有机碳与土壤粒径的关系分析

首先,从有机碳与土壤粒径的剖面含量变化分析二者关系。图 1、表 1 所示,剖面上 TOC、AOC、NOC 含量较高的第一类、第三类土地利用类型,<1 μm 、1—5 μm 、5—10 μm 、10—50 μm 的粒径含量也较高,而 50—250 μm 、250—1000 μm 的含量较低;剖面上 TOC、AOC、NOC 含量较低的第二类土地利用类型,<1 μm 、1—5 μm 、5—10 μm 、10—50 μm 的粒径含量也较低,而 50—250 μm 、250—1000 μm 的含量较高;这种变化以 50 μm 为分界。仅从土壤有机碳与不同粒径的含量变化来讲,TOC、AOC、NOC 含量与<50 μm 的粉粒、粘粒含量保持一致的变化,而与 50—250 μm 、250—1000 μm 的砂粒含量保持相反的趋势。

其次,从统计学角度分析二者之间的关系。分别对水田、戈壁、中覆盖度草地所有采样点剖面上不同深度(0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm)TOC、AOC、NOC 与不同土壤粒径含量进行相关分析,如表 2、表 3、表 4 所示,其中水田代表受人类耕作活动影响强度大的土地类型,戈壁代表区内土壤有机碳含量较低的土地类型,中覆盖度草地代表土壤有机碳含量较高的土地类型,基本可代表区内有机碳含量的高、中、低三类情况。

水田中(表 2),以 50 μm 为界限,TOC、AOC、NOC 与<50 μm 粒级中的 5—10 μm 、10—50 μm 的含量呈显著正相关($P<0.05$)或极显著正相关($P<0.01$);TOC、AOC、NOC 与>50 μm 粒级中的 50—250 μm 的含量呈显著负相关($P<0.05$)或极显著负相关($P<0.01$),与 250—1000 μm 的相关系数低于 50—250 μm ;TOC、AOC、NOC 与<1 μm 、1—5 μm 、1000—3000 μm 相关系数较小。

表 2 水田剖面上土壤总有机碳、活性有机碳、非活性有机碳与土壤粒径的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between SOC and soil particle size in the paddy field in 0—100 cm

土层深度/cm Depth	类型 Type	土壤粒径 Soil particle size/ μm						
		<1	1—5	5—10	10—50	50—250	250—1000	1000—3000
0—20	TOC	0.03	0.21	0.41 **	0.46 **	-0.41 **	-0.32 **	-0.22
	AOC	0.07	0.18	0.31 *	0.37 **	-0.28	-0.30 **	-0.20
	NOC	0.01	0.20	0.40 **	0.44 **	-0.41 **	-0.28	-0.20
20—40	TOC	-0.03	0.20	0.39 *	0.43 **	-0.32	-0.34	-0.20
	AOC	-0.02	0.14	0.36 *	0.47 **	-0.36 *	-0.28	-0.31
	NOC	-0.04	0.20	0.36 *	0.36 **	-0.26	-0.32	-0.12
40—60	TOC	0.29	0.24	0.35 *	0.47 **	-0.48 **	-0.27	0.17
	AOC	0.38 *	0.34 **	0.45 **	0.63 **	-0.40 *	-0.51 **	-0.13
	NOC	0.13	0.07	0.17	0.26	-0.36 *	-0.07	0.30
60—80	TOC	0.15	0.20	0.42 *	0.47 **	-0.40 *	-0.35 *	-0.10
	AOC	0.17	0.20	0.46 **	0.61 **	-0.42 *	-0.47 **	-0.27
	NOC	0.13	0.18	0.36 *	0.36 *	-0.36 *	-0.26	-0.01
80—100	TOC	0.29	0.30	0.40 *	0.52 **	-0.54 **	-0.38 *	-0.09
	AOC	0.44 **	0.44 **	0.55 **	0.66 **	-0.67 **	-0.56 **	-0.12
	NOC	0.20	0.21	0.30	0.41 *	-0.56 *	-0.27	-0.07

* 0.05 显著性水平下显著相关, ** 0.01 显著性水平下显著相关; 表 3 和表 4 同表 2

戈壁中(表 3),也呈现出以 50 μm 为界,TOC、AOC、NOC 与<50 μm 各粒级含量呈正相关,与>50 μm 的 50—250 μm 、250—1000 μm 粒级含量呈负相关,与 1000—3000 μm 无相关性。其中在表层 0—20 cm、20—40 cm 呈显著正相关($P<0.05$)或极显著正相关($P<0.01$),在深层 40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm 的相关性并不呈现有规律的显著相关。中覆盖度草地中(表 4),TOC、AOC、NOC 与<50 μm 各粒级含量呈正相关,与>50 μm 各粒级含量呈负相关,显著性或极显著相关没有呈现有规律的变化。

表 3 戈壁剖面上土壤总有机碳、活性有机碳、非活性有机碳与土壤粒径的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between SOC and soil particle size in the desert in 0—100 cm

土层深度/cm Depth	类型 Type	土壤粒径 Soil particle size / μm						
		<1	1—5	5—10	10—50	50—250	250—1000	1000—3000
0—20	TOC	0.75 *	0.77 **	0.76 *	0.76 *	-0.72 *	-0.70 *	-0.20
	AOC	0.69 *	0.67 *	0.63 *	0.75 *	-0.67 *	-0.64 *	-0.19
	NOC	0.73 *	0.77 **	0.77 **	0.72 *	-0.70 *	-0.68 *	-0.18
20—40	TOC	0.89 **	0.92 **	0.88 **	0.86 *	-0.91 **	-0.67	0.06
	AOC	0.79 *	0.77 *	0.68	0.69	-0.73	-0.55	0.04
	NOC	0.90 **	0.95 **	0.97 **	0.92 **	-0.97 **	-0.71	0.08
40—60	TOC	0.75	0.72	0.69	0.91 **	-0.44	-0.62	0.25
	AOC	0.53	0.54	0.53	0.72	-0.46	-0.47	0.60
	NOC	0.74	0.65	0.61	0.76 *	-0.19	-0.56	-0.42
60—80	TOC	0.76 *	0.73	0.76 *	0.91 **	-0.41	-0.67	0.24
	AOC	0.87 *	0.86 *	0.90 **	0.84 **	-0.58	-0.64	0.32
	NOC	0.31	0.25	0.28	0.53	-0.01	-0.47	0.02
80—100	TOC	0.85 *	0.83 *	0.83 *	0.90 *	-0.62	-0.63	-0.06
	AOC	0.86 *	0.78	0.78	0.88 *	-0.61	-0.60	0.31
	NOC	0.47	0.51	0.54	0.55	-0.36	-0.39	-0.49

表 4 中覆盖度草地剖面上土壤总有机碳、活性有机碳、非活性有机碳与土壤粒径的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between SOC and particle size in the middle density grassland in 0—100 cm

土层深度/cm Depth	类型 Type	土壤粒径 Soil particle size / μm						
		<1	1—5	5—10	10—50	50—250	250—1000	1000—3000
0—20	TOC	0.50	0.59	0.42	0.32	-0.64	-0.20	-0.11
	AOC	0.37	0.71 **	0.72 *	0.74 *	-0.58	-0.73	-0.44
	NOC	0.44	0.40	0.21	0.08	-0.51	0.06	0.05
20—40	TOC	0.26	0.76 *	0.84 **	0.75 *	-0.74 *	-0.77 *	-0.61
	AOC	0.18	0.28	0.80 *	0.59	-0.25	-0.71 *	-0.83 **
	NOC	0.38	0.82 **	0.70 *	0.67 *	-0.80 **	-0.65	-0.40
40—60	TOC	0.15	0.18	0.11	0.02	-0.27	-0.14	-0.08
	AOC	0.18	0.44	0.66	0.69 *	-0.38	-0.74 *	-0.26
	NOC	0.33	0.47	0.66	0.24	-0.33	-0.29	-0.40
60—80	TOC	0.16	0.48	0.64	0.55	-0.24	-0.72 *	-0.79 *
	AOC	0.03	0.38	0.69	0.73 *	-0.21	-0.89 **	-0.96 **
	NOC	0.20	0.37	0.37	0.22	-0.17	-0.34	-0.39
80—100	TOC	0.01	0.08	0.44	0.27	0.12	-0.53	0.24
	AOC	0.01	0.10	0.37	0.38	0.13	-0.60	-0.08
	NOC	0.02	0.06	0.41	0.14	0.08	-0.39	0.44

对裸土地、沙地、盐碱地、旱地的分析表明:裸土地、旱地中 TOC、AOC、NOC 与 $<50 \mu\text{m}$ 粒径呈不显著的正相关,与 $>50 \mu\text{m}$ 呈不显著负相关。沙地、盐碱地中 TOC、AOC、NOC 与粒径相关性不明显。这可能与样点数较少有关,需进一步的取样验证。

2.4 讨论

以上对不同土地利用类型土壤 TOC、AOC、NOC 及与不同土壤粒径的关系进行了分析。当一种土地利用方式被另外一种土地利用类型代替后,随着时间的变化土壤 TOC、AOC、NOC 含量及土壤颗粒的粒径分布在文中并未涉及。诸多研究表明,土地利用变化对土壤有机碳影响的实验方法可分两类:一是田间实验方法直接测定,需要不同时间的同一土地利用方式重复采样分析;二是间接获取,包括相邻样地成对比较、空间代替

时间法等,摆脱长时间重复样地实验观测,迅速获取土地利用变化信息下土壤有机碳的动态变化^[17]。这里采用空间法代替时间法,来探讨土地利用变化与土壤 TOC、AOC、NOC 含量及土壤颗粒的粒径分布的关系。

大量的研究表明,耕地变化是驱动中游土地利用变化的主要因素。当盐碱地、沙地、戈壁、裸土地转变为水田后,0—100 cm 土壤 TOC、AOC、NOC 均增加,表层增幅高于深层;而不同土壤粒径呈现:<50 μm 的各土壤颗粒粒径的含量呈不同程度增加,>50 μm 的粒径呈不同程度减少,其中 10—50 μm 粗粉粒含量增幅最大,50—250 μm 细砂粒降幅最大。说明土壤 TOC、AOC、NOC 的含量变化与<50 μm 的各粒级变化一致、与>50 μm 各粒级变化相反,其中与 10—50 μm 、50—250 μm 的关系最强。表 2、表 3 的统计结果印证了以上分析结果:土壤 TOC、AOC、NOC 的含量与<50 μm 各土壤粒径呈正相关,与>50 μm 的各土壤粒径呈负相关。相反,当水田废弃后,地上覆盖度降低,土地出现沙化、盐碱化等退化现象,土壤 TOC、AOC、NOC 含量降低,<50 μm 各土壤粒径的含量呈不同程度降低,>50 μm 各土壤粒径的含量呈不同程度增加,表现出与上述过程相反的变化趋势。

中覆盖度草地是一类剖面土壤 TOC、AOC、NOC 含量较高的自然植被覆盖的土地利用类型,当中覆盖度草地退化转变为盐碱地、沙地、戈壁、裸土地后,0—100 cm 土壤 TOC、AOC、NOC 均降低,不同土壤粒径的含量变化与水田转变为盐碱地、沙地、戈壁、裸土地的变化一致,呈现出<50 μm 的各土壤粒径的含量呈不同程度减少,>50 μm 的粒径呈不同程度增加;当中覆盖度草地转变为水田后,0—100 cm 土壤 TOC、AOC、NOC 均增加,但不同土壤粒径的含量变化与自然植被稀疏、低有机碳含量的盐碱地、沙地、戈壁、裸土地转变为水田的变化略有差异,体现在:10—50 μm 、50—250 μm 无明显变化,其他各粒级含量变化虽与盐碱地、沙地、戈壁、裸土地转变为水田的变化一致,但含量变化较小。可能是<10 μm 粘粒和细粉粒的增加粘附了更多有机碳,导致水田中 TOC、AOC、NOC 含量增加。如上所述,开垦提高了土壤有机碳含量、改变了不同土壤粒径的含量,影响土壤有机碳与粒径之间的关系。可以得出,土壤有机碳易于附着在<50 μm 的粉粒和粘粒上,而与>50 μm 砂粒作用弱。

有机碳是重要的有机胶体,粒径小的土粒是无机胶体,二者很容易形成有机-无机胶体。研究表明,有机质含量高而粘粒含量低的土壤中,有机物的胶结作用在土壤团聚体形成中起主要作用;有机质含量少,粘粒含量高的土壤中,主要依靠粘粒的内聚力^[18]。苏永中等^[7]认为,黑河绿洲农田土壤粘粒和细粉粒对团聚体的作用最大,有机碳和碳酸钙作用次之,但有机碳和碳酸钙对团聚体稳定性的影响较粘粒和粉粒更明显。大量研究表明,耕作是增加绿洲土壤有机碳含量的重要途径^[3],本文结果也显示,粉粒和粘粒与土壤 TOC、AOC、NOC 的关系显著,是影响和控制团聚体形成的重要因素。图 1 所示,旱地、水田与其他土地利用类型相比,粘粒和粉粒的含量(水田 76.200%,水田 63.192%)高于盐碱地、沙地、戈壁、裸土地、中覆盖度草地。因此,土壤有机碳和粘粒、粉粒的增加为团聚体的形成提供了基础。有机碳含量的增加一方面提高有机碳与粘粒和粉粒形成团聚体的稳定性,另一方面减缓了有机碳的转化速度,是绿洲耕作土壤有机碳增加的内在原因。当地表植被覆盖度较高的中覆盖度草地转变为地表稀疏的盐碱地、沙地、戈壁、裸土地后,土壤 TOC、AOC、NOC、粘粒、粉粒含量的增加与耕作引起这些指标变化一致,说明增加地表植被覆盖度、退化生态系统的植被恢复、农田耕种都是提高土壤有机碳的有效方式。

土地荒漠化、沙漠化是区内另一个土地利用类型变化的驱动因素。剖面上有机碳含量较低的盐碱地、沙地、戈壁、裸土地,地上植被稀疏,主要是有机物料来源少,<1 μm 、1—5 μm 、5—10 μm 、10—50 μm 的粘粒、粉粒则是稳定有机碳的因素,因区内风力大、活动频繁,粘粒、粉粒物质很容易被吹走,因此,土壤有机碳和粘粒、粉粒的缺乏不能为团聚体形成提供条件,是造成绿洲区土壤有机碳减少和流失的重要原因。采取可行的防风固沙措施、增加地表植被数量、减缓生态系统的退化速率、减少和稳定土壤细颗粒物质的流失是保护土壤有机碳的途径。

因土壤 TOC、AOC、NOC 性质、含量的差异,土地开垦和退化过程中他们的变化速率不同。前期的研究表明,随着耕作时间的延长,TOC、AOC、NOC 的含量均呈增加趋势,但 AOC、NOC 的增幅存在差异,在耕作的初

期(0—5a),AOC 的增幅高于 NOC,而 20a 的耕地 NOC 增幅大于 AOC,之后达到 AOC 与 NOC 的增幅接近(>100a)的动态发展趋势^[19]。随垦殖年限的延长(0—20a),新疆绿洲农田土壤总有机碳呈增加后维持平衡水平,而活性有机碳、轻组有机碳、颗粒有机碳呈先增加后下降的趋势^[3]。文中只是对不同土地利用类型土壤 TOC、AOC、NOC 及与不同土壤粒径的关系进行了有限分析,有关有机碳的动态变化及与不同土壤粒径的关系(包括自然土地利用被开垦为耕地及耕地废弃后)在本文并未涉及,开展这一工作将有助于深入了解土壤有机碳及其组成的变化机制。

3 结论

戈壁、旱地、裸土地、沙地、水田、盐碱地、中覆盖度草地剖面上土壤 TOC、AOC、NOC 的含量与粒径的分布存在一定的变化规律,剖面上每一层中 TOC、AOC、NOC 含量由高到低基本与<1 μm 、1—5 μm 、5—10 μm 、10—50 μm 的粒径含量保持一致的变化趋势,而与 50—250 μm 、250—1000 μm 的粒径含量保持相反的趋势。这种变化以 50 μm 为分界。旱地、水田、中覆盖度草地剖面上 TOC、AOC、NOC 的含量较戈壁、裸土地、沙地、盐碱地高,其中 5—10 μm 、10—50 μm 的粒径含量也高于后者,与 TOC、AOC、NOC 的趋势一致,而 50—250 μm 、250—1000 μm 粒径含量低于后者,与 TOC、AOC、NOC 的趋势相反。说明<50 μm 的粉粒和粘粒可起到固碳作用,而 50—250 μm 、250—1000 μm 的砂粒起碳损失作用。

统计结果表明,以 50 μm 为分界,水田、戈壁、中覆盖度草地剖面上 TOC、AOC、NOC 与<50 μm 的粒径含量呈正相关,与>50 μm 的呈负相关。剖面上三类有机碳与不同粒径的相关系数、相关程度存在较大差异,当土地里利用方式发生变化,TOC、AOC、NOC、不同粒径含量的变化及其相关关系的改变是土壤有机碳变化机制和土壤固碳机理的关键所在。

粉粒和粘粒与土壤 TOC、AOC、NOC 的关系显著,是影响和控制团聚体形成的重要因素。分析发现,增加地表植被覆盖度、退化生态系统的植被恢复、农田耕种都是提高土壤有机碳的有效方式。土地荒漠化、沙漠化造成粘粒、粉粒含量减少,土壤有机碳和粘粒、粉粒的缺乏不能为团聚体形成提供条件,是造成绿洲区土壤有机碳减少和流失的重要原因。采取可行的防风固沙措施、增加地表植被数量、减缓生态系统的退化速率、减少和稳定土壤细颗粒物质的流失是保护土壤有机碳的途径。

致谢:本文得到中国科学院寒区旱区环境与工程研究所肖洪浪课题组的支持,特此致谢。

References:

- [1] Ge Q S, Dai J H, He F N, Pan Y, Wang M M. Land use and land cover change of the past 300 years in China and carbon cycle research. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 38(2): 197-210.
- [2] Houghton R A, Hackler J L. Sources and sinks of carbon from land-use change in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 1034, doi: 10.1029/2002GB001970.
- [3] Xu W L, Tang G M, Sheng J D, Liang Z, Zhou B, Zhu M. Effects of cultivation on organic carbon fractionation and aggregate stability in Xinjiang oasis soils. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1773-1779.
- [4] Su Y Z. Soil carbon and nitrogen sequestration following cropland to forage grassland conversion in the marginal land in the middle of Heihe river basin, Northwest China. *Environmental Science*, 2006, 27(7): 1312-1318.
- [5] Tan W F, Zhu Z F, Liu F, Hu R G, Shan S J. Organic carbon distribution and storage of soil aggregates under land use change in Jiangnan plain, Hubei province. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(6): 973-980.
- [6] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2176-2183.
- [7] Su Y Z, Wang F, Zhang Z H, Du M W. Soil properties and soil aggregate characteristics in marginal farmlands of oasis in middle Hexi corridor region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(4): 741-748.
- [8] Wang G X, Yang L Y, Chen L, Jumpei KUBOTA. Impacts of land use changes on groundwater resources in the Heihe river basin. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(3): 456-466.
- [9] Wang G X, Ma H Y, Wang Y B, Chang J. Impacts of land use change on environment in the middle reaches of the Heihe river. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(4): 359-367.

- [10] Zhang Y, Liu G M, Ma H Y, Wang G X. Changing characteristics of land-use and land-cover in the Heihe river basin, China during 1987—2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 740-746.
- [11] Zheng B H, Tian Z Q, Li Z C. The course and cause analysis of environment degeneration in Heihe river basin. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(1): 62-66.
- [12] Meng J J, Wu X Q, Li Z G. Land use and land cover changes in Heihe river basin during the period of 1988—2000. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2004, 40(6): 922-929.
- [13] Wang G X, Chen G D. Land desertification status and developing trend in the Heihe river basin. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(4): 368-374.
- [14] Qi S Z, Wang T, Luo F, Ding J L. Dynamic changes of sandy desertification land in the Zhangye region of the middle reaches of the Heihe river, Northwestern China. *Journal of Mountain Science*, 2005, 23(2): 153-157.
- [15] Huo Y Z, Li T J. *Experiment Practice of Soil Geography*. Beijing: Higher Education Press, 1986: 19-23.
- [16] Loginow W, Wisniwski W, Gonet S S, Ciescinska B. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, 20(1): 47-52.
- [17] Chen Z, Lü C H, Fan L, Wu H. Effects of land use change on soil organic carbon: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5358-5371.
- [18] Wen Q, Guan X. Progress in the study on soil aggregate formation. *Arid Zone Research*, 2004, 21(4): 432-438.
- [19] Zhang J H, Li G D, Nan Z G, Xiao H L. Effects of cultivation history and cropping system on soil organic carbon and its components in oasis soils. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(2): 196-203.

参考文献:

- [1] 葛全胜, 戴君虎, 何凡能, 潘娜, 王梦麦. 过去 300 年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 2008, 38(2): 197-210.
- [3] 徐万里, 唐光木, 盛建东, 梁智, 周勃, 朱敏. 垦殖对新疆绿洲农田土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2010, 30(7): 1773-1779.
- [4] 苏永中. 黑河中游边缘绿洲农田退耕还草的土壤碳、氮固存效应. *环境科学*, 2006, 27(7): 1312-1318.
- [5] 谭文峰, 朱志峰, 刘凡, 胡荣桂, 单世杰. 江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累特点. *自然资源学报*, 2006, 21(6): 973-980.
- [6] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2003, 23(6): 2176-2183.
- [7] 苏永中, 王芳, 张智慧, 杜明武. 河西走廊中段边缘绿洲农田土壤性状与团聚体特征. *中国农业科学*, 2007, 40(4): 741-748.
- [8] 王根绪, 杨玲媛, 陈玲, 洼田顺平. 黑河流域土地利用变化对地下水资源的影响. *地理学报*, 2005, 60(3): 456-466.
- [9] 王根绪, 马海燕, 王一博, 常娟. 黑河流域中游土地利用变化的环境影响. *冰川冻土*, 2003, 25(4): 359-367.
- [10] 张钰, 刘桂民, 马海燕, 王根绪. 黑河流域土地利用与覆被变化特征. *冰川冻土*, 2004, 26(6): 740-746.
- [11] 郑丙辉, 田自强, 李子成. 黑河流域土地覆盖变化与生态环境退化过程分析. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(1): 62-66.
- [12] 蒙古军, 吴秀芹, 李正国. 黑河流域 1988—2000 年土地利用/覆被变化研究. *北京大学学报: 自然科学版*, 2004, 40(6): 922-929.
- [13] 王根绪, 程国栋. 黑河流域土地荒漠化及其变化趋势. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 368-374.
- [14] 齐善忠, 王涛, 罗芳, 丁建亮. 黑河中游张掖地区沙漠化土地动态变化. *山地学报*, 2005, 23(2): 153-157.
- [15] 霍亚贞, 李天杰. *土壤地理实验实习*. 北京: 高等教育出版社, 1986: 19-23.
- [17] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 武红. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展. *生态学报*, 2011, 31(18): 5358-5371.
- [18] 文倩, 关欣. 土壤团聚体形成的研究进展. *干旱区研究*, 2004, 21(4): 432-438.
- [19] 张俊华, 李国栋, 南忠仁, 肖洪浪. 耕作历史和种植制度对绿洲农田土壤有机碳及其组分的影响. *自然资源学报*, 2012, 27(2): 196-203.

CONTENTS

Temporal and spatial dynamic changes and landscape pattern response of Hemeroby in Dayang estuary of Liaoning Province, China	SUN Yongguang, ZHAO Dongzhi, WU Tao, et al (3645)
Distribution characteristics of plant communities and soil organic matter and main nutrients in the Poyang Lake Nanji Wetland	ZHANG Qunjun, YU Xiubo, QIAN Jianxin, et al (3656)
Evaluation and construction of wetland ecological network in Qingdao City	FU Qiang, SONG Jun, MAO Feng, et al (3670)
Driving forces analysis for ecosystem health status of littoral zone with dikes: a case study of Lake Taihu	YE Chun, LI Chunhua, WANG Qiuguang, et al (3681)
The concentrations distribution and composition of nitrogen and phosphor in stormwater runoff from green roofs	WANG Shumin, HE Qiang, ZHANG Junhua, et al (3691)
Effects of slope gradient on the community structures and diversities of soil fauna	HE Xianjin, WU Pengfei, CUI Liwei, et al (3701)
Investigation of populations of parasitic wasps parasitizing <i>Carposina sasakii</i> Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae) in jujube orchards in China, with respect to the wasp-host relationship	YAO Yanxia, ZHAO Wenxia, CHANG Jupu, et al (3714)
Assessment of ardeidae waterfowl habitat suitability based on a binary logistic regression model	ZOU Lili, CHEN Xiaoxiang, HE Ying, et al (3722)
Combined effects of temperature, salinity and pH on the clearance rate of juveniles of <i>Pinctada martensii</i> (Dunker)	ZHU Xiaowen, WANG Hui, LIU Jin, et al (3729)
Soil nutrient dynamics and loss risks in a chicken-forage mulberry-medicinal plant intercropping system	ZHAO Liping, YANG Guiming, ZHAO Tongke, et al (3737)
Soil particle size distribution and its relationship with soil organic carbons under different land uses in the middle of Heihe river	ZHANG Junhua, LI Guodong, NAN Zhongren (3745)
Effects of DEM resolution and watershed subdivision on hydrological simulation in the Xingzihe watershed	QIU Linjing, ZHENG Fenli, YIN Runsheng (3754)
Impacts of grid sizes on urban heat island pattern analysis	GUO Guanhua, CHEN Yingbiao, WEI Jianbing, et al (3764)
Landscape connectivity analysis for the forest landscape restoration: a case study of Gongyi City	CHEN Jie, LIANG Guofu, DING Shengyan (3773)
Carbon footprint analysis on urban energy use: a case study of Xiamen, China	LIN Jianyi, MENG Fanxin, CUI Shenghui, et al (3782)
The ecological footprint of alpine pastures at the village-level: a case study of Hezuo in Gannan Autonomous Prefecture, China	WANG Lucang, GAO Jing (3795)
The ecosystem health assessment of the littoral zone of Lake Taihu	LI Chunhua, YE Chun, ZHAO Xiaofeng, et al (3806)
The biomass of <i>Bashania fargesii</i> in giant pandas habitat in Qinling Mountains	DANG Kunliang, CHEN Junxian, SUN Feixiang, et al (3816)
Effects of salinity on seed germination and seedling growth in halophyte <i>Limonium aureum</i> (L.) Hill	YOU Jia, WANG Wenrui, LU Jin, et al (3825)
Liana-host tree associations in the tropical montane primary forest and post-harvest forest of Bawangling, Hainan Island, China	LIU Jinxian, TAO Jianping, HE Zeet al (3834)
The response of photosynthetic characters and biomass allocation of <i>P. bournei</i> young trees to different light regimes	WANG Zhenxing, ZHU Jinmao, WANG Jian, et al (3841)
Genetic variation among populations of the endangered <i>Sinocalycanthus chinensis</i> based on morphological traits and ISSR profiles	JIN Zexin, GU Jingjing, LI Junmin (3849)
Growth response to climate in Chinese pine as a function of tree diameter	JIANG Qingbiao, ZHAO Xiuhai, GAO Lushuang, et al (3859)
Age structure and spatial distribution of the rare and endangered plant <i>Alcimandra cathcartii</i>	YUAN Chunming, MENG Guangtao, FANG Xiangjing, et al (3866)
The water consumption and water use efficiency of the seedlings of <i>Eucalyptus grandis</i> and other five tree species in Sichuan Province	HU Hongling, ZHANG Jian, WAN Xueqin, et al (3873)
Effects of leaf litter of <i>Cinnamomum septentrionale</i> on growth and resistance physiology of <i>Brassica rapa</i> in the decomposition process of litter	HUANG Weiwei, HU Tingxing, ZHANG Niannian, et al (3883)
Water transport velocity and efficiency in <i>Quercus variabilis</i> detected with deuterium tracer and thermal dissipation technique	SUN Shoujia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (3892)
The saxicolous moss's features of absorbing water and its structural adaptability in the heterogeneous environment with rock desertification	ZHANG Xianqiang, ZENG Jianjun, CHEN Jinwu, et al (3902)
Effects of organic materials containing copper on soil enzyme activity and microbial community	CHEN Lin, GU Jie, GAO Hua, et al (3912)
Comparison of floral morphology and pollination characteristics between the sexes in <i>Eurya obtusifolia</i>	WANG Qian, DENG Hongping, DING Bo, et al (3921)
Climatic suitability of potential spring maize cultivation distribution in China	HE Qijin, ZHOU Guangsheng (3931)
Effects of uniconazole dry seed dressing on nitrogen accumulation and translocation and kernel protein quality in wheat	FAN Gaoqiong, YANG Ennian, ZHENG Ting, et al (3940)
Review and Monograph	
International comparison and policy recommendation on the development model of industrial symbiosis in China	SHI Lei, LIU Guoguo, GUO Siping (3950)
Scientific Note	
The Change of landscape pattern in Zhenlai Xian, Jilin Province in recent ten years	ZHANG Guokun, LU Jinghua, SONG Kaishan, et al (3958)
Footprint analysis of turbulent flux over a poplar plantation in Northern China	JIN Ying, ZHANG Zhiqiang, FANG Xianrui, et al (3966)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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

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 32 卷 第 12 期 (2012 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 12 (June, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 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:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元