

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 21 期 Vol.33 No.21 **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 21 期 2013 年 11 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究..... 欧阳志云,朱春全,杨广斌,等 (6747)
- 气候变化对传染病爆发流行的影响研究进展..... 李国栋,张俊华,焦耿军,等 (6762)
- 好氧甲烷氧化菌生态学研究进展 负娟莉,王艳芬,张洪勋 (6774)
- 氮沉降强度和频率对羊草叶绿素含量的影响..... 张云海,何念鹏,张光明,等 (6786)
- 世界蜘蛛的分布格局及其多元相似性聚类分析..... 申效诚,张保石,张 锋,等 (6795)
- 风向因素对转基因抗虫棉花基因漂移效率的影响..... 朱家林,贺 娟,牛建群,等 (6803)

个体与基础生态

- 长江口及东海春季底栖硅藻、原生动物和小型底栖生物的生态特点 孟昭翠,徐奎栋 (6813)
- 长江口横沙东滩围垦潮滩内外大型底栖动物功能群研究..... 吕巍巍,马长安,余 骥,等 (6825)
- 沔阳沿岸土壤和优势植物重金属富集特征和潜在生态风险..... 杨 阳,周正朝,王欢欢,等 (6834)
- 盐分和底物对黄河三角洲区土壤有机碳分解与转化的影响..... 李 玲,仇少君,檀菲菲,等 (6844)
- 短期夜间低温胁迫对秋茄幼苗碳氮代谢及其相关酶活性的影响..... 郑春芳,刘伟成,陈少波,等 (6853)
- 32 个切花菊品种的耐低磷特性 刘 鹏,陈素梅,房伟民,等 (6863)
- 年龄和环境条件对泥蚶富集重金属镉和铜的影响..... 王召根,吴洪喜,陈肖肖,等 (6869)
- 角倍蚜虫瘿对盐肤木光合特性和总氮含量的影响..... 李 杨,杨子祥,陈晓鸣,等 (6876)
- 多噬伯克霍尔德氏菌 WS-FJ9 对草甘膦的降解特性 李冠喜,吴小芹,叶建仁 (6885)
- 金龟甲对蓖麻叶挥发物的触角电位和行为反应..... 李为争,杨 雷,申小卫,等 (6895)

种群、群落和生态系统

- 白洋淀生态系统健康评价..... 徐 菲,赵彦伟,杨志峰,等 (6904)
- 珠海鹤洲水道沿岸红树林湿地大型底栖动物群落特征 王 卉,钟 山,方展强 (6913)
- 典型森林和草地生态系统呼吸各组分间的相互关系..... 朱先进,于贵瑞,王秋凤,等 (6925)
- 抚育间伐对油松人工林下大型真菌的影响..... 陈 晓,白淑兰,刘 勇,等 (6935)
- 百山祖自然保护区植物群落 beta 多样性 谭珊珊,叶珍林,袁留斌,等 (6944)
- 土霉素对堆肥过程中酶活性和微生物群落代谢的影响..... 陈智学,谷 洁,高 华,等 (6957)

景观、区域和全球生态

- 兴安落叶松针叶解剖结构变化及其光合能力对气候变化的适应性 季子敬,全先奎,王传宽 (6967)
- 盐城海滨湿地景观演变关键土壤生态因子与阈值研究..... 张华兵,刘红玉,李玉凤,等 (6975)

半干旱区沙地芦苇对浅水位变化的生理生态响应 马赞花,张铜会,刘新平 (6984)

SWAT 模型融雪模块的改进 余文君,南卓铜,赵彦博,等 (6992)

科尔沁沙地湖泊消涨对气候变化的响应..... 常学礼,赵学勇,王 玮,等 (7002)

贝壳堤岛 3 种植被类型的土壤颗粒分形及水分生态特征..... 夏江宝,张淑勇,王荣荣,等 (7013)

三峡库区古夫河着生藻类叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素..... 吴述园,葛继稳,苗文杰,等 (7023)

资源与产业生态

煤炭开发对矿区植被扰动时空效应的图谱分析——以大同矿区为例..... 黄 翌,汪云甲,李效顺,等 (7035)

学术信息与动态

《中国当代生态学研究》新书推介 刘某承 (7044)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 300 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 30 * 2013-11



封面图说: 百山祖保护区森林植物群落——百山祖国家级自然保护区位于浙西南闽浙交界处,由福建武夷山向东北伸展而成,主峰海拔 1856.7m,为浙江省第二高峰。其独特的地形和水文地理环境形成了中亚热带气候区中一个特殊的区域,保存着十分丰富的植物种质资源以及国家重点保护野生动植物种,尤其是 1987 年由国际物种保护委员会列为世界最濒危的 12 种植物之一的百山祖冷杉,是第四纪冰川的孑遗植物,素有“活化石”之称。随着海拔的升高,其植被为常绿阔叶林、常绿-落叶阔叶混交林、针阔混交林、针叶林、山地矮林和山地灌草丛。

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/stxb201207140994

夏江宝, 张淑勇, 王荣荣, 赵艳云, 孙景宽, 刘京涛, 刘庆. 贝壳堤岛 3 种植被类型的土壤颗粒分形及水分生态特征. 生态学报, 2013, 33(21): 7013-7022.

Xia J B, Zhang S Y, Wang R R, Zhao Y Y, Sun J K, Liu J T, Liu Q. Water ecology and fractal characteristics of soil particle size distribution of three typical vegetations in Shell Island. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(21): 7013-7022.

贝壳堤岛 3 种植被类型的土壤颗粒分形 及水分生态特征

夏江宝^{1,2}, 张淑勇^{1,3,*}, 王荣荣^{1,3}, 赵艳云¹, 孙景宽¹, 刘京涛¹, 刘庆¹

(1. 滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256603;

2. 山东省黄河三角洲野生植物资源开发利用工程技术研究中心, 滨州 256603; 3. 山东农业大学林学院, 泰安 271018)

摘要:运用土壤粒径质量分布原理与分形学理论,以黄河三角洲贝壳堤岛的 3 种植被类型为研究对象,以裸地为对照,测定分析土壤颗粒分形维数、粒径组成和水分物理参数,探讨不同植被类型的土壤颗粒分形特征及其影响因素。结果表明:贝壳砂土壤中粗砂粒含量最高;其次是细砂粒,而石砾和粉粘粒含量较低。灌木林地和草地具有降低石砾、粗砂粒,增加细砂粒和粉粘粒含量的作用。不同植被类型土壤颗粒分形维数均值在 1.5845—1.9157 之间,大小依次为酸枣林、杠柳林和草地,表层高于 20—40cm 土层。酸枣林、杠柳林及草地 0—40cm 土壤容重均值分别比裸地低 23.87%, 14.51% 和 10.47%;总孔隙度均值分别比裸地增加 16.96%, 16.71% 和 1.31%。植被恢复措施对贝壳砂表层的孔隙结构、疏松程度改善较好,草地及灌木林地的蓄水性能均表现为 0—20cm 高于 20—40cm。土壤颗粒分形维数与粉粘粒含量、毛管孔隙度、总孔隙度、饱和蓄水量、吸持蓄水量等呈极显著正相关,与细砂粒含量呈显著正相关,与粗砂粒含量和容重呈极显著负相关,与石砾含量、非毛管孔隙度、滞留蓄水量的相关性不大。从土壤分形维数及其水分生态特征来看,贝壳堤岛 3 种植被类型的改良土壤物理性质及蓄水保土功能表现为灌木林好于草地,其中酸枣林好于杠柳林,0—20cm 好于 20—40cm 土层。

关键词:分形维数;土壤粒径分布;土壤水分;植被类型;贝壳堤岛

Water ecology and fractal characteristics of soil particle size distribution of three typical vegetations in Shell Island

XIA Jiangbao^{1,2}, ZHANG Shuyong^{1,3,*}, WANG Rongrong^{1,3}, ZHAO Yanyun¹, SUN Jingkuan¹, LIU Jingtiao¹, LIU Qing¹

1 Binzhou University, Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou 256603, China

2 Shandong Provincial Engineering and Technology Research Center for Wild Plant Resources Development and Application of Yellow River Delta, Binzhou 256603, China

3 College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

Abstract: Little information is available about soil particle-size distribution in shell ridge ecosystems. Based on the principle of quality distribution of soil particle size and fractal theory, *Periploca sepium* Bunge, *Ziziphus jujuba* var. *spinosa* Hu and *Messerschmidia sibirica* Linn. growing on Shell Island, located on the Yellow River Delta, were analyzed in contrast with bare soil to determine the fractal dimensions of soil particles, soil particle-size distribution and soil water physical characteristics, in order to explore the effects of different vegetation types on soil pore structure and hydrological physical

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31100468);山东省高校科技发展计划资助项目(J13LC03);国家科技支撑资助项目(2009BADB2B05);山东省黄河三角洲生态环境重点实验室开放基金资助项目(2012KFJJ04)

收稿日期:2012-07-14; 修订日期:2012-11-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhsyong@126.com

characteristics, and the effect of fractal mechanisms of different vegetation types on soil particle composition in shell sand habitats. The results showed that: 1) In shell sand soil, the distribution of soil particles among three typical vegetations was as follows: coarse sand, fine sand, gravel and silt-clay. And the mean value of coarse, fine sand, gravel and silt-clay was 61.31%, 19.97%, 17.33%, 1.39%, respectively, indicating that grassland and shrub could decrease the particle content of gravel and coarse sand, and improve the content of soil fine sand and silt-clay, which performed well in 0—20cm soil layer. With the vegetation restoration measures, the mean value of fractal dimension of shell sand varied from 1.5845 to 1.9157. The sequence of fractal dimension was as follows: *Z. jujuba* var. *spinosa* Hu, *P. sepium* Bunge and Grassland, and the surface soil layer was larger than that in 20—40cm soil layer. Fractal dimension had a very significant positive correlation with silt-clay ($r=0.940, P<0.01$), a significant positive correlation with fine sand ($r=0.771, P<0.05$), and a very significant negative correlation with coarse sand ($r=-0.947, P<0.01$), but the correlation with gravel was not obvious. 2) The mean value of soil density in 0—40cm of *Z. jujuba* var. *spinosa* Hu, *P. sepium* Bunge and Grassland were lower by 23.87%, 14.51% and 10.47%, respectively, compared with bare land (1.48 g/cm^3); the mean value of total porosity of soil increased by 16.96%, 16.71%, 1.31%, respectively, compared with bare land (45.39%), and the degree of porosity in the surface soil layer was higher than that in 20—40cm soil layer. Fractal dimension had a very significant negative correlation with soil density, and a very significant positive correlation with capillary porosity and total porosity, but there was no significant correlation with non-capillary porosity. In shell sand habitats, the ventilation permeability was better with soil porosity decreasing, fractal dimension as well; but the higher soil-compacting degree, the bigger soil density, fractal dimension was lower. 3) Vegetation restoration measures could well improve pore structure of shell sand surface and the degree of porosity, as well as ventilation, pervious performance. Soil water storage capacity of grasslands and shrub land all performed better in 0—20cm than that in 20—40cm. Under shell sand habitats, fractal dimension had a very significant positive correlation with total water-storage capacity and capillary water-storage capacity, but the correlation with non-capillary water-storage capacity was not obvious. Judging from the fractal characteristics and soil hydrological physical characteristics, we concluded that the sequence of improving the capacity of soil physical properties and soil and water conservation of three typical vegetations in Shell Island was that shrub, was better than grassland, among which, *Z. jujuba* var. *spinosa* Hu was better than *P. sepium* Bunge, and soil layer in 0—20cm than that in 20—40cm.

Key Words: fractal dimension; soil particle-size distribution; soil water; vegetation type; Shell Island

土壤颗粒分形特征不但表征土壤粒径的大小组成及孔隙分布^[1-2],还能反映土壤水力学特征^[3]、土壤质地均匀程度及通气透水性^[4-5]及土壤肥力^[6]等特性。利用粒径的重量分布描述土壤颗粒组成的分形维数具有求解精确、简便的特点^[7-9],因此,这一方法得到广泛应用。目前对土壤颗粒分形特征的研究已有传统的分形维数与不同土壤质地关系的分析^[8-9]集中到某一具体立地类型、同种土壤质地下的不同土地利用方式或植被恢复措施效益分析及土壤质量评价等方面,如用土壤颗粒分形特征反映科尔沁沙地农田沙漠化演变过程^[10]、库布齐沙漠沙柳沙障构建方式优劣^[11]、沂蒙山区的植被恢复效果^[12]、土石山区林地土壤质量评价^[5,13]、黄河三角洲滩地^[6]及黄土丘陵沟壑区^[14]土地利用类型比较、退耕还湖安庆沿江湿地土壤演变状况^[15]等,同时也从单一的土壤颗粒分形向不同土壤类型的多重分形维数转变^[14,16-19]。

贝壳堤是淤泥质或粉砂质海岸所特有的一种滩脊类型,黄河三角洲的滨州市无棣、沾化县境内分布着两道贝壳堤,与天津、河北的贝壳堤相连,组成规模宏大、国内独有的贝壳滩脊海岸,与美国圣路易斯安娜州和南美苏里南的贝壳堤并称为世界三大古贝壳堤,在世界第四纪地质和海岸地貌研究中占有极其重要的位置^[20]。贝壳堤岛这一独特的生态系统,引起了众多学者的关注,目前对黄河三角洲贝壳堤岛的研究主要集中在贝壳堤岛脆弱生态系统特征及其保护管理对策^[20-21]、植被及微生物分布特征^[22]、典型灌草生理生态特征^[23-24]及贝壳沙中微量元素含量和形态特征^[25]等方面,而对该区域主要灌草植被恢复措施下的贝壳砂土壤颗粒分形

特征及其影响因素的分析尚未见报道。鉴于此,本文以黄河三角洲贝壳堤岛的杠柳(*Periploca sepium* Bunge)林、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa* Hu)林及砂引草(*Messerschmidia sibirica* Linn.)草地 3 种植被类型为研究对象,并以裸地为对照,运用土壤单重分形学原理与方法,测定分析贝壳堤岛不同植被类型的土壤颗粒分形维数、颗粒组成、容重、孔隙度及蓄水性能等指标,探讨不同植被类型对土壤物理结构的改良作用,阐明贝壳砂植被恢复措施下的土壤颗粒分形特征及其影响因素,以其为贝壳砂生境下的土壤颗粒分形学机制奠定基础,为黄河三角洲贝壳堤岛灌草种类选择及模式构建提供理论依据和技术参考。

1 研究地概况

本研究选择在山东滨州市无棣县中东部滨海低地的汪子岛(38°02′51″—38°21′06″N, 117°46′58″—118°05′43″E),总面积约 435.4 km²,位于滨州贝壳堤岛与湿地国家级自然保护区的缓冲区内(图 1)。该保护区属于暖温带东亚季风大陆性半湿润气候区,多年平均降水量为 550 mm,主要集中在 6—9 月份,占全年降水量的 71%以上;多年平均蒸发量为 2430.6 mm,蒸降比为 4.4。多年平均气温为 12.36℃,极端最低气温为 -25.3℃,极端最高气温为 37.5℃;多年平均日照 2849 h/a,平均无霜期 205 d。贝壳堤岛地势平坦,海拔一般在 5 m 以下,潜水水位浅,矿化度高。贝壳砂平均厚度达 1.0—2.5 m,局部达 3—4 m,土壤类别主要是贝壳砂土类和滨海盐土类,向海侧和向陆侧以滨海盐渍土为主,成土母质由风积物和钙质贝壳土壤化组成。植被类型

以草本、灌木为主,现有树种较少,受自然因素和平岛挖砂等人类活动的影响,贝壳堤岛植被主要种如杠柳、酸枣、柽柳(*Tamarix chinensis* Lour)等形成的天然次生灌木林在逐步减少,草本以砂引草、獐毛(*Aeluropus sinensis* (Debeaux) Tzvel)、二色补血草(*Limonium bicolor* (Bunge) O.Ktunze)等为主。

2 研究材料与方法

2.1 研究样地

在贝壳堤岛灌草植被集中分布的滩脊地带,选择生境条件一致的酸枣、杠柳天然次生灌木林,及以砂引草为主的草地为试验样地,并以相同地段的贝壳砂裸地作为对照。酸枣林平均树高 1.65 m,平均基茎 1.38 cm,林分郁闭度 0.85,覆盖度 90%,树龄平均为 8 a 生,林下草本以青蒿(*Artemisia carvifolia* Buch.)、地肤(*Kochia scoparia* (Linn.) Schrad)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)为主。杠柳林平均树高 1.36 m,平均基茎 1.21 cm,林分郁闭度 0.75,覆盖度 85%,树龄平均为 6 a 生,林下草本以狗尾草(*Setaria viridis* (Linn.) Beauv.)、鹅绒藤(*Cynanchum chinense* (Thunb.) Mak.)为主。砂引草为多年生草本,主要借根状茎的延伸进行无性繁殖,水分适宜时,也能用正常的种子繁殖,株高平均为 0.38 m,覆盖度 65%,伴生种有青蒿和地肤。

2.2 土壤样品的采集与测定

在每种植被类型内设置 3 个面积为 10 m×10 m 的样地,在每个样地内按 S 形选取 5 个测点,取 0—20 cm 以及 20—40 cm 土层的土壤样品,把同一样地 5 个土壤样品分层混匀后,进行风干处理。烘干法测定土壤含水量,环刀浸水法测定土壤容重和孔隙度等参数^[26],并由公式计算一定土层深度内的吸持蓄水量、滞留蓄水量和饱和蓄水量^[27],本研究按 0.2 m 深度计算。样品风干处理后,采用机械筛分法与比重计法测定土壤粒径质量分布,粒径分级标准依据中国制和参考文献^[12]。基于 Turcotte^[28]和 Sperry^[29]等土壤颗粒分形维数计算公式,利用 Tyler 等^[3]和杨培岭等^[7]推导出的新模型公式,土壤颗粒分形维数计算公式可表示如下:

$$D = 3 - \frac{\lg(W_i/W_0)}{\lg(d_i/d_{\max})} \quad (1)$$

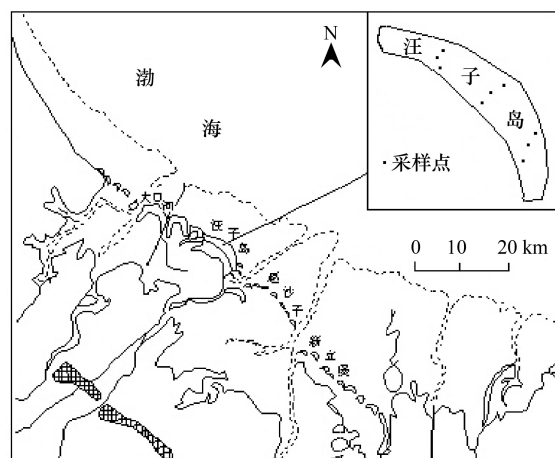


图 1 贝壳堤岛不同植被类型的土壤采样点示意图

Fig.1 Schematic map of sampling sites of soil under different vegetation types in Shell Island

式中, D 为土壤颗粒分形维数; d_i 为两相邻粒级 d_i 与 d_{i+1} 间土粒平均直径 (mm); $d_{\max}$ 为最大粒级土粒平均直径 (mm); W_i 为直径小于 d_i 的累积质量 (g); W_0 为土壤样品总质量 (g)。具体应用时, 首先求出土壤样品不同粒径 d_i 的 $\lg(d_i/d_{\max})$ 和 $\lg(W_i/W_0)$ 值, 并将两者进行线性拟合分析求得斜率 K , 则土壤分形维数为 $D = 3 - K$ 。具体的土壤粒径计算原理及推导过程详见文献^[8,11]。采用 SPSS13.0 统计软件中的 one-way ANOVA、LSD ($\alpha = 0.05, 0.01$ 和 0.001) 和 Pearson 相关分析方法分别进行方差分析、多重比较和相关性分析。

3 结果与分析

3.1 土壤颗粒组成与分形维数

3.1.1 不同植被类型的土壤颗粒组成

由表 1 可知, 贝壳砂土壤中, 粗砂粒含量最高, 在 50.15%—72.30% 之间, 平均为 61.31%; 其次为细砂粒, 含量在 8.65%—32.65% 之间, 平均为 19.97%; 而石砾和粉粘粒含量相对较低, 石砾含量在 12.65%—20.13% 之间, 平均为 17.33%; 粉粘粒含量在 0.25%—4.92% 之间, 平均仅为 1.39%。表明贝壳砂生境内粗砂粒、细砂粒含量显著高于石砾、粉粘粒, 具有壤质砂土特点, 属于多砾质粗砂土的范畴^[8]。不同植被类型土壤粒径的质量分布差异极显著 ($F = 380.449$, Sig. = 0.000, $P < 0.001$), 3 种植被类型 0—40cm 贝壳砂土壤剖面中石砾含量差异极显著 ($F = 12.234$, Sig. = 0.000, $P < 0.001$), 均值大小依次为草地 < 杠柳林 < 酸枣林 < 裸地, 分别比裸地低 20.43%、16.87% 和 3.98%。粗砂粒含量差异极显著 ($F = 11.205$, Sig. = 0.000, $P < 0.001$), 均值大小依次为酸枣林 < 杠柳林 < 草地 < 裸地, 分别比裸地低 15.85%、11.78% 和 2.76%。细砂粒含量差异极显著 ($F = 8.740$, Sig. = 0.000, $P < 0.001$), 均值大小依次为杠柳林 > 酸枣林 > 草地 > 裸地, 分别比裸地高 71.37%、62.10% 和 38.33%。粉粘粒含量差异极显著 ($F = 14.727$, Sig. = 0.000, $P < 0.001$), 均值大小依次为酸枣林 > 杠柳林 > 草地 > 裸地, 分别是裸地的 8.26、4.08 和 2.18 倍。表明灌木林地和草地具有减小石砾和粗砂粒含量, 增加细砂粒和粉粘粒含量的作用, 即植被恢复措施, 具有使贝壳砂由粗粒径向细粒径转变的效能。在垂直结构上, 不同植被类型不同颗粒分布表现出一定的差异, 占主要成分的粗砂粒均表层低于 20—40cm, 细砂粒除草地差异不显著外 ($P > 0.05$), 其他均表现为表层高于 20—40cm。占百分比最少的粉粘粒含量均表现为表层高于 20—40cm, 石砾含量除杠柳林外, 其他均表现为表层高于 20—40cm。

表 1 各植被类型土壤中不同粒径范围土壤颗粒质量与总质量百分比

Table 1 Ration of soil particle mass of different size to total mass in different vegetation types

植被类型 Vegetation type	土层深度 Soil depth /cm	土壤粒级 Soil particle size distribution/%						
		石砾 Gravel/mm	粗砂粒 Coarse sand/mm			细砂粒 Fine sand/mm		粉粘粒 Silt-clay/mm
		2.0—1.0	1.0—0.5	0.5—0.25	0.25—0.2	0.2—0.1	0.1—0.05	<0.05
杠柳林	0—20	12.69	35.98	16.43	23.49	9.01	0.10	2.29
<i>P. sepium</i> Bunge	20—40	19.43	50.67	13.98	11.50	3.76	0.02	0.64
酸枣林	0—20	19.90	37.30	12.89	17.66	7.29	0.06	4.92
<i>Z. jujuba</i> var. <i>spinosa</i> Hu	20—40	17.18	38.92	22.56	16.41	3.63	0.24	1.05
草地 Grassland	0—20	16.31	27.45	36.44	12.04	6.42	0.44	0.90
	20—40	14.50	28.44	36.73	14.73	4.96	0.06	0.56
裸地 Bare land	0—20	19.94	39.35	21.08	12.42	6.71	0.09	0.41
	20—40	18.67	39.96	32.32	5.11	3.44	0.17	0.32

3.1.2 土壤颗粒分形维数与土壤粒级分布的关系

3 种植被类型及裸地 0—40cm 土壤颗粒分形维数差异极显著 ($F = 24.70$, Sig. = 0.000, $P < 0.001$), 均值大小表现为酸枣林 > 杠柳林 > 草地 > 裸地 (图 2), 与裸地相比, 分别增加 36.52%、23.67%、12.92%。在垂直结构上, 土壤颗粒分形维数均表现为表层高于 20—40cm 土层, 差异均极显著 ($P < 0.001$)。不同土壤层次颗粒分形维数大小均表现为酸枣林 > 杠柳林 > 草地 > 裸地, 0—20cm 分形维数分别比裸地高 48.39%、32.75% 和 15.69%; 20—40cm 分形维数分别比裸地高 23.96%、14.07% 和 9.98%。表明不同的植被恢复措施对贝壳砂土壤分形维数影响较大, 并且随着贝壳砂深度的不同, 其分形维数也表现出较大差异。

土壤颗粒分形维数对各个粒级土粒含量的反映程度不同,为确定分形维数与各粒级含量的关系,对分形维数与石砾、粗砂粒、细砂粒和粉粘粒的含量进行相关性分析(图 3)。土壤颗粒分形维数与粉粘粒含量呈极显著正相关(相关系数 $r=0.940, P<0.01$),与细砂粒呈显著正相关($r=0.771, P<0.05$),与粗砂粒含量呈极显著负相关($r=-0.947, P<0.01$),与石砾含量的相关性不显著($r=0.417, P>0.05$)。可见,贝壳砂生境下,土壤颗粒分形维数随粉粘粒以及细砂粒含量的增加而增加,随粗砂粒含量的增加而减少,其中,对土壤颗粒分形维数影响程度较大的是粗砂粒和粉粘粒含量,其次是细砂粒含量,石砾含量较小。

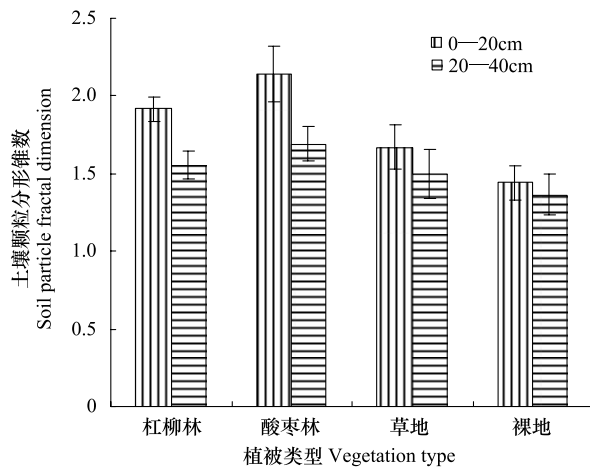


图 2 不同植被类型下的土壤颗粒分形维数

Fig.2 Soil particle fractal dimension in different vegetation types

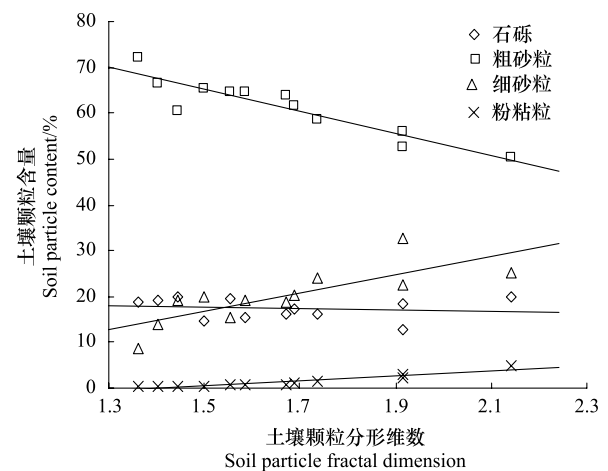


图 3 土壤颗粒分形维数与粒径组成的相关性

Fig.3 Relationships between soil fractal dimension and soil particle content

3.2 土壤颗粒分形维数与土壤容重和孔隙度

各植被类型下的土壤容重均低于裸地(表 2), 差异显著 ($F=17.212, \text{sig.}=0.001, P<0.05$), 其中 0—40cm 土壤容重均值酸枣林、杠柳林、草地, 分别比裸地低 23.87%, 14.51% 和 10.47%。总孔隙度差异显著 ($F=9.607, \text{sig.}=0.005, P<0.05$), 均值大小为酸枣林>杠柳林>草地, 分别比裸地高 16.96%, 16.71% 和 1.31%, 表明酸枣林的通气透水性能较好, 其次为杠柳林, 草地较差。酸枣林和杠柳林的毛管孔隙度均值较高, 差异不显著 ($P>0.05$), 草地的毛管孔隙度与裸地接近, 表明酸枣林和杠柳林土壤中有效水的贮存容量较大, 利于植被根系对水分的有效利用, 而草地在维持自身生长发育所贮存水分的潜能相对较低。非毛管孔隙度均值最大的为杠柳林, 比裸地增加 74.17%, 涵养水源潜能相对较好; 而酸枣林和草地差异不显著 ($P>0.05$), 仅比裸地增加 22.50%, 12.71%。在垂直结构上, 土壤容重表现为表层低于 20—40cm 土层, 总孔隙度和毛管孔隙度则与之相反。

表 2 不同植被类型的土壤容重和孔隙度特征

Table 2 Character of soil density and porosity in different vegetation types

植被类型 Vegetation type	土层深度 Soil depth/cm	土壤容重 Soil density /(g/cm ³)	总孔隙度 Total porosity /%	毛管孔隙度 Capillary porosity /%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity /%
杠柳林 <i>P. sepium</i> Bunge	0—20	1.24	56.66	52.18	4.48
	20—40	1.29	49.27	45.39	3.88
酸枣林 <i>Z. jujuba</i> var. <i>spinosa</i> Hu	0—20	1.04	54.20	51.37	2.83
	20—40	1.21	51.95	48.90	3.05
草地 Grassland	0—20	1.25	47.42	45.14	2.28
	20—40	1.40	44.53	41.40	3.13
裸地 Bare land	0—20	1.44	47.73	45.23	2.50
	20—40	1.52	43.04	40.74	2.30

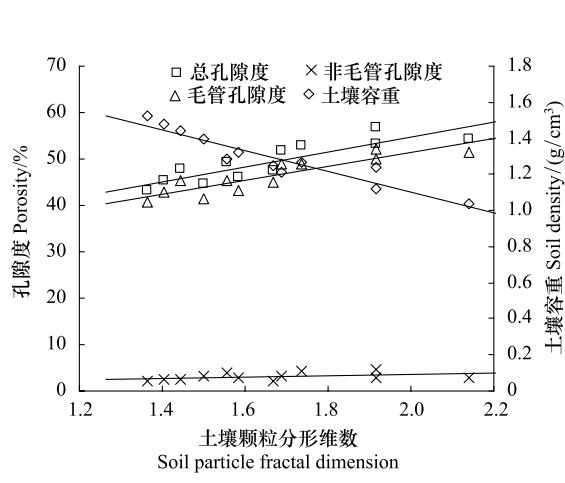


图4 土壤颗粒分形维数与土壤容重和孔隙度的相关性

Fig.4 Relationships between soil fractal dimension and soil density and porosity

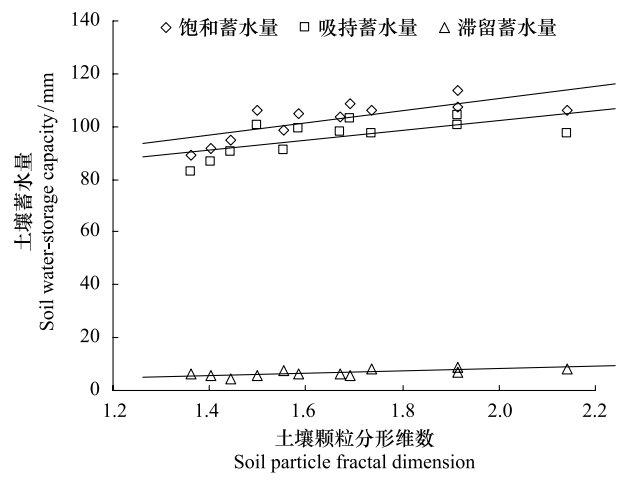


图5 土壤颗粒分形维数与土壤蓄水量的相关性

Fig.5 Relationships between soil fractal dimension and soil water-storage capacity

由图4可知,土壤颗粒分形维数与土壤容重呈极显著负相关($r=-0.928, P<0.01$),与毛管孔隙度、总孔隙度均呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为0.883,0.857,与非毛管孔隙度的相关性不显著($r=0.350, P>0.05$)。可见,土壤颗粒分形维数对土壤容重和孔隙度状况的反映程度不一样,其中反映程度最大的是土壤容重,其次是毛管孔隙度,总孔隙度次之。表明贝壳砂生境下土壤容重越小,总孔隙度和毛管孔隙度越大,土壤颗粒分形维数越大,但土壤颗粒分形维数难以反映非毛管孔隙度的大小。

3.3 土壤颗粒分形维数与土壤蓄水性能

不同植被类型下土壤饱和蓄水量($F=9.628, sig.=0.006, P<0.05$)、吸持蓄水量($F=7.606, sig.=0.010, P<0.05$)差异均显著,均值大小均表现为酸枣林>杠柳林>草地(表3),其中饱和蓄水量分别比裸地高16.94%、16.70%和1.30%,吸持蓄水量分别比裸地高16.63%、13.49%和0.66%。滞留蓄水量差异极显著($F=25.011, sig.=0.000, P<0.001$),均值大小表现为杠柳林>酸枣林>草地,分别是裸地的1.74、1.23和1.13倍,表明酸枣林供给植物有效水利用较好,杠柳林涵养水源潜能较好,草地贮存水分的能力较差。在垂直结构上,饱和蓄水量及吸持蓄水量均表现为土壤表层大于20—40cm。

表3 不同植被类型的土壤蓄水性能

Table 3 Soil water-storage capacity in different vegetation types

植被类型 Vegetation type	土层深度 Soil depth/cm	饱和蓄水量 Total water-storage capacity/mm	吸持蓄水量 Capillary water-storage capacity/mm	滞留蓄水量 Non-capillary water-storage capacity/mm
杠柳林	0—20	113.32	104.36	8.96
<i>P. sepium</i> Bunge	20—40	98.54	90.78	7.7
酸枣林	0—20	105.93	97.57	8.36
<i>Z. jujuba</i> var. <i>spinosa</i> Hu	20—40	108.4	102.74	5.66
草地 Grassland	0—20	103.9	97.8	6.1
	20—40	106.15	100.27	5.88
裸地 Bare land	0—20	94.84	90.28	4.56
	20—40	89.06	82.8	6.26

土壤颗粒分形维数与饱和蓄水量($r=0.855, P<0.01$)、吸持蓄水量($r=0.881, P<0.01$)均呈极显著正相关,与滞留蓄水量的相关性不明显($r=0.340, P>0.05$)(图5)。表明土壤颗粒分形维数对土壤蓄水指标的反映程

度不一样,其中反映程度最大的是饱和蓄水量,其次是吸持蓄水量。即饱和蓄水量和吸持蓄水量越大,土壤颗粒分形维数越大,但土壤颗粒分形维数对滞留蓄水量的反映程度不高。

4 讨论与结论

4.1 贝壳砂土壤颗粒分形维数与土壤颗粒组成的关系

土壤颗粒组成与分形维数,除了与成土母质、土壤质地、物理化学风化过程有关外^[8-9,30],还与土地利用方式^[6,14]、不同植被类型^[5-6,12]有一定关系。在相同地段、相同生境内,植被可通过地表覆盖、枯枝落叶层的拦截降雨、减弱风蚀、水蚀等过程,保存了地表的细砂粒及粉粘粒含量;同时枯落物形成的腐殖质层及植物根系本身穿插、残体及分泌物均可有效改变土壤物理结构和化学性能,从而影响土壤的颗粒组成及分形维数^[5-6,12,16]。黄河三角洲贝壳堤岛滩脊地带的粗砂粒含量最高,其次为细砂粒,石砾和粉粘粒含量较低。研究表明,属于潮土类型的黄河三角洲滩地有林地粉粒含量最高,但棉花地和荒草地砂粒含量最高^[6];属于棕壤类型的冀北山地森林土壤中粗粉粒和沙粒含量显著高于细黏粒、细粉粒,混交林的细粒含量均高于纯林^[13]。可见,贝壳砂生境内土壤主要来源于风化的贝壳,颗粒组成相对较粗,但灌木林地及草地具有降低贝壳砂石砾、粗砂砾,增加细砂粒和粉粘粒的作用,并且 0—20cm 土层表现明显,即植被措施具有较好的增加贝壳砂细颗粒含量的作用,并且灌木林地好于草地,这与其植被覆盖度高、生物量大,根系发达有一定关系。

土壤粒径大小及含量对土壤颗粒间的组合、孔隙大小、数量及几何形态都起着决定作用^[3,9,19]。我国不同质地类型内土壤分形维数按砂土类-壤土类-粘壤土类-粘土类四大类质地顺序,依次增大,测量范围值在 1.834—2.904 之间,其中壤质砂土最低,范围值在 1.834—2.641 之间^[8]。黄河三角洲滩地荒草地及有林地土壤颗粒分形维数在 2.4657—2.6798 之间^[6],山地森林土壤颗粒分形维数在 2.0570—2.3739 之间^[13],而贝壳砂土壤颗粒分形维数为 1.3632—2.1416,明显低于壤土、粘壤土及粘土类,表层高于 20—40cm 土层,3 种植被类型的分形维数大小依次为酸枣林、杠柳林、草地,均值为 1.7452,接近壤质砂土的测量最低值 1.834^[8],可见与山地森林或黄河滩地土壤相比,贝壳堤岛的土壤粗颗粒较多,分形维数偏低。但贝壳堤岛的灌木林及荒草地仍提高了相同生境下的分形维数,由裸地的 1.4032 增至酸枣林下的 1.9157,增幅为 36.52%,表明灌木林下贝壳砂变细,易形成良好的土壤结构,分形维数有增大趋势,0—20cm 土层这种改善作用较为明显,酸枣林分形维数表层最高,这与其覆盖度最大,分解层枯枝落叶丰厚易增加表层土壤养分含量和粉粘粒含量有一定关系。同时树木根系的生长影响土壤的物理化学以及生物学性质,加快了土壤风化的速度及腐殖质的形成,有利于细砂粒物质的固定^[5,12,16]。而草地覆盖度较低,枯落物储量低,细小颗粒易被风蚀掉,草本植物根系较浅且不发达,土壤易粗粒化,分形维数较低。在无植被覆盖的地方,因风蚀而引起细颗粒和营养物质被吹蚀,土壤有粗粒化变重趋势,粗砂粒含量最多,保水性能差,植被生长困难,易恶变为严重的退化沙化质地^[10-11]。

科尔沁沙地农田沙漠化演变过程中^[10],黄河三角洲滩地不同土地利用方式下^[6],山地典型森林植被下^[5,13]的土壤颗粒分形维数与土壤中砂粒、粗粉粒含量呈显著负相关,而与粘粒、粉粒含量呈显著的正相关,这与本研究结果基本一致。贝壳砂土壤颗粒分形维数与粉粘粒含量呈极显著正相关,与细砂粒呈显著正相关,与粗砂粒含量呈显著负相关,但与大粒径石砾含量相关性不显著,与相关研究表明土壤质地由粗到细,分形维数由小到大的结论一致^[3-4,8-9],可见土壤颗粒分形维数在描述贝壳砂这一特殊土壤质地是可行的。土壤颗粒分形维数对各个粒级土粒含量的反映程度有一定差异,总体表现为土壤颗粒组成或团粒组成的分形维数是随着土壤质地变细而增大,随粗粒径砂粒含量的增加而变小,这一规律随土壤质地、土地利用方式或植被类型的不同略有差异,如冀北山地森林与黏粒含量相关性不显著^[13],重庆四面山林地土壤分形维数与粉粒含量的相关性不显著^[5],这可能与成土母质、土壤粒径分布范围、含量及质地均匀程度有关。

4.2 贝壳砂土壤颗粒分形维数与土壤物理参数的关系

结构良好的土壤容重为 1.25—1.35 g/cm³,水气关系协调的土壤总孔隙度为 40%—50%。贝壳堤岛灌木林地及草地土壤容重在 1.04—1.44 g/cm³,均低于裸地,总孔隙度为 44.53%—56.66%,表明植被覆盖对贝壳砂土壤物理结构改善较好,灌木林地 0—20cm 总孔隙度达 54.20%以上,土壤容重表层低于 20—40cm 土层,这

与表层枯落物回归土壤及腐殖质层的形成有一定关系,较高的覆盖度,在一定程度上减弱了风蚀及降雨对土壤的冲刷淋蚀,且较多的残次根系使毛管孔隙度增大,在一定程度上改善了土壤通气状况^[5,12]。裸地总孔隙度偏低,容重偏大,可能与泥质海岸上潮时携带的淤泥堆积有一定关系,而有植被覆盖的地方,除了植被本身的改良土壤效应外,向海侧的酸枣、杠柳及怪柳等冲浪林带能有效抵挡潮滩淤泥。

山地森林土壤分形维数与土壤容重呈正相关,与总孔隙度呈负相关关系^[13]。一般而言,土壤分形维数越高,土壤质地越粘重,通透性越差;分形维数越低,土壤结构越松散^[9]。但来源于风化未全的贝壳砂,土壤颗粒较粗,孔隙度较大,不利于贮存水分,因此,植被恢复措施下的贝壳砂生境则呈现与之相反的变化规律,土壤颗粒分形维数与土壤容重呈极显著负相关,与毛管孔隙度、总孔隙度呈极显著正相关,与非毛管孔隙度相关性不显著。即贝壳砂生境下,土壤孔隙度大、通气透水性能好,则分形维数也越高;而土壤变得密实,容重增大,则分形维数也越低;与山地森林表现规律不一致^[13],这主要与贝壳砂土壤中粗粒径含量相对较高、分形维数相对较低有一定关系,这也表明随着土壤颗粒组成、粒径大小及含量的不同,土壤颗粒分形维数与土壤的疏松程度、通气性能表现出一定的阈值效应。

4.3 贝壳砂土壤颗粒分形维数与土壤蓄水性能的关系

吸持蓄水量为毛管持水,主要用来贮存植物生理用水,滞留蓄水量为非毛管持水,多反映植被的涵养水源功能,饱和蓄水量为吸持贮存与滞留贮存的总和,可反映植被减少地表径流和防止土壤侵蚀的功能^[26,31]。黄河三角洲滩地有林地 0—40cm 饱和蓄水量在 82.69—102.85mm,吸持蓄水量在 79.07—93.34mm,滞留蓄水量在 2.02—9.51mm^[31];贝壳堤岛灌木林及草地 0—40cm 饱和蓄水量在 89.06—113.32mm,吸持蓄水量在 82.80—104.36mm,滞留蓄水量在 4.56—8.96mm。可见,从保持水土、植物有效水利用及水源涵养的角度来看,贝壳堤岛滩脊地带好于黄河滩地,贝壳砂具有一定涵蓄水分的潜力,并且灌木林的蓄水性能好于草地。植被恢复措施对贝壳砂表层的孔隙结构、疏松程度改善较好,通气、透水性能比较协调,因此灌木林地及草地的蓄水性能均表现为 0—20cm 高于 20—40cm,这与黄河滩地的白蜡林、刺槐林结果类似^[31]。

土壤孔隙大小分布决定着土壤持水性能,土壤颗粒分形维数在一定程度上能够反映土壤的蓄水特性^[5,13]。冀北山地森林土壤颗粒分形维数与最大持水量呈负相关,与田间持水量相关性不显著^[13];但重庆四面山林地下的土壤颗粒分形维数与饱和含水量、毛管持水量和田间持水量均呈正相关,与非毛管孔隙度呈负相关^[5],这与本研究结果类似,贝壳砂生境下土壤颗粒分形维数与饱和蓄水量、吸持蓄水量呈极显著正相关,而与滞留蓄水量相关性不大,表明土壤颗粒分形维数随着成土母质、植被类型的不同,对土壤蓄水性能的反映表现出一定的差异。分形维数高的土壤中细沙粒或粘粒含量相对较高,而粘粒含量高的土壤利于土壤团聚体的形成,可改善土壤通气、透水性能,增强土壤毛管孔隙度;同时单位土粒表面积越大,土壤对水分子的吸附力越大,土壤的持水性能易增强^[5]。从土壤颗粒分形及其水分生态特征来看,贝壳堤岛 3 种植被类型的改良土壤物理性质及蓄水保土功能表现为灌木林好于草地,其中酸枣林好于杠柳林。

References:

- [1] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: analysis and limitations. *Soil Science Society of American Journal*, 1992, 56(2): 362-369.
- [2] Bittelli M, Campbell G S, Flury M. Characterization of particle-size distribution in soils with a fragmentation model. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(4): 782-788.
- [3] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Science Society of American Journal*, 1989, 53(4): 987-996.
- [4] Wu C Z, Hong W. Fractal features of soil aggregate structure under different management model. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 162-167.
- [5] Wang X, Zhang H J, Cheng J H, Zhang K, Zhang J W, Song N, Sun L. Fractal characteristics and related affecting factors of particle size distribution of different forest soil in Simian Mountains Chongqing. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 154-159.
- [6] Lü S Q, Gao P, Geng G P, Zhang J, Xia J B. Characteristics of soil particles and their correlation with soil organic matter in low lands of the Yellow River Delta. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 134-138.

- [7] Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Soil fractal character token by particle mass distribution. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [8] Li D C, Zhang T L. Fractal features of particle size distribution of soils in China. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(4): 263-265.
- [9] Huang G H, Zhan W H. Fractal property of soil particle size distribution and its application. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 490-497.
- [10] Su Y Z, Zhao H L. Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin Sandy Land. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 71-74.
- [11] Li H L, Wan L L, Dong Z, Liu Z, Wang L Y. Effects of sand barriers of *Salix Psammophila* on soil particle size and fractal dimension. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(3): 540-545.
- [12] Liu X, Zhang G C, Heathman G C, Wang Y Q, Huang C H. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China. Geoderma, 2009, 154(1/2): 123-130.
- [13] Liu Y, Chen B, Yang X B, Zhao X M, Wang Y M. Fractal characteristics of soil particles of typical forest in north mountain of Hebei Province. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(3): 159-163, 168.
- [14] Wang D, Fu B J, Chen L D, Zhao W W, Wang Y F. Fractal analysis on soil particle size distributions under different land-use types: a case study in the loess hilly areas of the Loess Plateau, China. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7): 3081-3089.
- [15] Zhang P J, Zhao Y Q. Fractal features of soil particles of riverain wetlands recovered from farmlands in Anqing, Anhui Province. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(2): 128-132.
- [16] Yu D M, Hu X L, Zhang G C, Liu X, Yao X Y, Hu X L. Multifractal analysis on soil particle size distribution for different vegetation types in Jiangzihe small watershed. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(5): 79-85.
- [17] Martín M A, Rey J M, Taguas F J. Anentropy based heterogeneity index form as size distributions in earth science. Ecological Modelling, 2005, 182(3/4): 221-228.
- [18] Martín M A, Montero E. Laser diffraction and multifractal analysis for the characterization of dry soil volume-size distributions. Soil and Tillage Research, 2002, 64(1/2): 113-123.
- [19] Filgueira R R, Fournier L L, Cerisola C I, Gelati P, Garcia M G. Particle-size distribution in soils: a critical study of the fractal model validation. Geoderma, 2006, 134(3/4): 327-334.
- [20] Tian J Y, Xie W J, Sun J K. Current status of vulnerable ecosystem of shell islands and protection measures in Yellow River Delta. Environmental science and management, 2009, 34(8): 138-143.
- [21] Liu Z J, Zhang X L, Li P, Li P Y, Xu Y Q. Protectionstatus and management countermeasures of Binzhou shell barrier islands and wetlands system. Ocean Development and Management, 2010, 27(1): 65-68.
- [22] Zhao Y Y, Hu X M, Liu J T. Distribution characteristics of soil microorganisms and its relationship with vegetation in shell bars. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(2): 267-270.
- [23] Xia J B, Tian J Y, Zhang G C, Li T. Photosynthetic and physiological characteristics of three shrubs species in shell islands of Yellow River Delta. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(7): 1452-1459.
- [24] Li T, Liu Q, Tian J Y, Sun J K. Reponses on salt stress on characteristics of growth and protective enzymes of *Limonium Bicolor* in shell islands of the Yellow River Delta. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(1): 85-88.
- [25] Liu Q, Sun J K, Tian J Y, Lv Z J, Xu S. The characteristics of microelements content and forms of seashell islands in Yellow River Delta. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 204-207, 212.
- [26] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. ed. Soil Physical and Chemical Analysis. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978: 511-512, 522-524.
- [27] Xia J B, Xie W J, Lu Z H, Jia Q, Dong L J. Effects of different irrigation modes with reclaimed water on soil eco-hydrological characteristics of reed land. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(15): 4137-4143.
- [28] Turcotte D L. Fractal fragmentation. Journal of Geography Research, 1986, 91(12): 1921-1926.
- [29] Sperry J S, Hacke U G. Desert shrub water relations with respect to soil characteristics and plant functional type. Functional Ecology, 2002, 16(3): 367-378.
- [30] Montero E. Renyi dimensions analysis of soil particle-size distributions. Ecological Modelling, 2005, 182(3/4): 305-315.
- [31] Xu J W, Li C R, Xia J B, Liu L J, Wang Y H. Soil hydrological properties of different forest types in lowlands of the Yellow River Delta. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 173-176.

参考文献:

- [4] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究. 土壤学报, 1999, 36(2): 162-167.
- [5] 王贤, 张洪江, 程金花, 张焜, 张静雯, 宋楠, 孙龙. 重庆四面山几种林地土壤颗粒分形特征及其影响因素. 水土保持学报, 2011, 25

(3): 154-159.

- [6] 吕圣桥, 高鹏, 耿广坡, 张杰, 夏江宝. 黄河三角洲滩地土壤颗粒分形特征及其与土壤有机质的关系. 水土保持学报, 2011, 25(6): 134-138.
- [7] 杨培岭, 罗元培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [8] 李德成, 张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究. 土壤与环境, 2000, 9(4): 263-265.
- [9] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用. 土壤学报, 2002, 39(4): 490-497.
- [10] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征. 生态学报, 2004, 24(1): 71-74.
- [11] 李红丽, 万玲玲, 董智, 刘振, 王丽英. 沙柳沙障对沙丘土壤颗粒粒径及分形维数的影响. 土壤通报, 2012, 43(3): 540-545.
- [13] 刘阳, 陈波, 杨新兵, 赵心苗, 王永明. 冀北山地典型森林土壤颗粒分形特征. 水土保持学报, 2012, 26(3): 159-163, 168.
- [14] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 赵文武, 汪亚峰. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析——以黄土丘陵沟壑区为例. 生态学报, 2007, 27(7): 3081-3089.
- [15] 张平究, 赵永强. 退耕还湖后安庆沿江湿地土壤颗粒分形特征. 生态与农村环境学报, 2012, 28(2): 128-132.
- [16] 于东明, 胡小兰, 张光灿, 刘霞, 姚孝友, 胡续礼. 江子河小流域不同植被类型土壤粒径的多重分形特征. 中国水土保持科学, 2011, 9(5): 79-85.
- [20] 田家怡, 谢文军, 孙景宽. 黄河三角洲贝壳堤岛脆弱生态系统破坏现状及保护对策. 环境科学与管理, 2009, 34(8): 138-143.
- [21] 刘志杰, 张晓龙, 李萍, 李培英, 徐元芹. 滨州贝壳堤岛与湿地系统保护现状及其管理对策. 海洋开发与管理, 2010, 27(1): 65-68.
- [22] 赵艳云, 胡相明, 刘京涛. 贝壳堤地区微生物分布特征及其与植被分布的关系. 水土保持通报, 2012, 32(2): 267-270.
- [23] 夏江宝, 田家怡, 张光灿, 李田. 黄河三角洲贝壳堤岛 3 种灌木光合生理特征研究. 西北植物学报, 2009, 29(7): 1452-1459.
- [24] 李田, 刘庆, 田家怡, 孙景宽. 黄河三角洲贝壳堤岛二色补血草生长和保护酶特性对盐胁迫的响应. 水土保持通报, 2010, 30(1): 85-88.
- [25] 刘庆, 孙景宽, 田家怡, 吕振江, 许帅. 黄河三角洲贝壳堤岛贝壳沙中微量元素含量及形态特征. 水土保持学报, 2009, 23(4): 204-207, 212.
- [26] 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 511-512, 522-524.
- [27] 夏江宝, 谢文军, 陆兆华, 贾琼, 董立杰. 再生水浇灌方式对芦苇地土壤水文生态特性的影响. 生态学报, 2010, 30(15): 4137-4143.
- [31] 许景伟, 李传荣, 夏江宝, 刘立杰, 王月海. 黄河三角洲滩地不同林分类型的土壤水文特性. 水土保持学报, 2009, 23(1): 173-176.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.21 Nov., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Gross ecosystem product: theory framework and case study OUYANG Zhiyun, ZHU Chunquan, YANG Guangbin, et al (6747)
- Advances in impacts of climate change on infectious diseases outbreak LI Guodong, ZHANG Junhua, JIAO Gengjun, et al (6762)
- Ecology of aerobic methane oxidizing bacteria (methanotrophs) YUN Juanli, WANG Yanfen, ZHANG Hongxun (6774)
- Nitrogen deposition and *Leymus chinensis* leaf chlorophyll content in Inner Mongolian grassland
..... ZHANG Yunhai, HE Nianpeng, ZHANG Guangming, et al (6786)
- Worldwide distribution and multivariate similarity clustering analysis of spiders
..... SHEN Xiaocheng, ZHANG Baoshi, ZHANG Feng, et al (6795)
- The influence of wind direction on pollen-mediated gene flow in transgenic insect-resistant cotton
..... ZHU Jialin, HE Juan, NIU Jianqun, et al (6803)

Autecology & Fundamentals

- Ecological characteristics of benthic diatoms, protozoa and meiobenthos in the sediments of the Changjiang Estuary and East China
Sea in spring MENG Zhaoxui, XU Kuidong (6813)
- Macrobenthic functional groups at the reclamation and natural tidal flats of Hengsha East Shoal, the Estuary of Changjiang River
..... LV Weiwei, MA Chang'an, YU Ji, et al (6825)
- Enrichment and ecological risk of heavy metal in soils and dominant plants in the riparian of the Fenghe River
..... YANG Yang, ZHOU Zhengchao, WANG Huanhuan, et al (6834)
- Effects of salinity and exogenous substrates on the decomposition and transformation of soil organic carbon in the Yellow River
Delta LI Ling, QIU Shaojun, TAN Feifei, et al (6844)
- Effects of short-term dark chilling on leaves carbon and nitrogen metabolism and involved activities of enzymes in mangrove *Kandelia
obovata* seedling ZHENG Chunfang, LIU Weicheng, CHEN Shaobo, et al (6853)
- Preliminary evaluation on tolerance to phosphorous deficiency of 32 cultivars of cut chrysanthemum
..... LIU Peng, CHEN Sumei, FANG Weimin, et al (6863)
- Effects of age and environmental conditions on accumulation of heavy-metals Cd and Cu in *Tegillarca granosa*
..... WANG Zhaogen, WU Hongxi, CHEN Xiaoxiao, et al (6869)
- Effects of Chinese gallnut on photosynthetic characteristics and total nitrogen content of *Rhus chinensis*
..... LI Yang, YANG Zixiang, CHEN Xiaoming, et al (6876)
- The characterization of glyphosate degradation by *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 LI Guanxi, WU Xiaoqin, YE Jianren (6885)
- Electroantennographic and behavioural responses of scarab beetles to *Ricinus communis* leaf volatiles
..... LI Weizheng, YANG Lei, SHEN Xiaowei, et al (6895)

Population, Community and Ecosystem

- Ecosystem health assessment in Baiyangdian Lake XU Fei, ZHAO Yanwei, YANG Zhifeng, et al (6904)
- Characteristics of macrobenthic communities in mangrove wetlands along the waterways of North Hezhou, Zhuhai, South China
..... WANG Hui, ZHONG Shan, FANG Zhanqiang (6913)
- The interaction between components of ecosystem respiration in typical forest and grassland ecosystems
..... ZHU Xianjin, YU Guirui, WANG Qiufeng, et al (6925)
- Effects of thinning on macro fungi and their relationship with litter decomposition in *Pinus tabulaeformis* plantations
..... CHEN Xiao, BAI Shulan, LIU Yong, et al (6935)

- Beta diversity of plant communities in Baishanzu Nature Reserve TAN Shanshan, YE Zhenlin, YUAN Liubin, et al (6944)
- Effect of Oxytetracycline (OTC) on the activities of enzyme and microbial community metabolic profiles in composting
 CHEN Zhixue, GU Jie, GAO Hua, et al (6957)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Variations in leaf anatomy of *Larix gmelinii* reflect adaptation of its photosynthetic capacity to climate changes
 JI Zijing, QUAN Xiankui, WANG Chuankuan (6967)
- The studying of key ecological factors and threshold of landscape evolution in Yancheng Coastal wetland
 ZHANG Huabing, LIU Hongyu, LI Yufeng, et al (6975)
- Eco-physiological response of *Phragmites communis* to water table changes in the Horqin Sand Land
 MA Yunhua, ZHANG Tonghui, LIU Xinping (6984)
- Improvement of snowmelt implementation in the SWAT hydrologic model ... YU Wenjun, NAN Zhuotong, ZHAO Yanbo, et al (6992)
- Responses of lake fluctuation to climate change in Horqin Sandy Land
 CHANG Xueli, ZHAO Xueyong, WANG Wei, et al (7002)
- Water ecology and fractal characteristics of soil particle size distribution of three typical vegetations in Shell Island
 XIA Jiangbao, ZHANG Shuyong, WANG Rongrong, et al (7013)
- Spatio-temporal distribution of epilithic algal chlorophyll a in relation to the physico-chemical factors of Gufu River in Three Gorges Reservoir WU Shuyuan, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al (7023)

Resource and Industrial Ecology

- Graphic analysis of spatio-temporal effect for vegetation disturbance caused by coal mining: a case of Datong Coal Mine Area
 HUANG Yi, WANG Yunjia, LI Xiaoshun, et al (7035)

《生态学报》2014 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,探索生态学奥秘,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,280 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 余新晓

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 21 期 (2013 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 21 (November, 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