

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

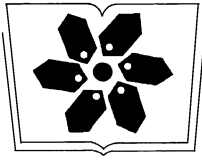
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第4期 Vol.32 No.4 **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 4 期

2012 年 2 月 (半月刊)

目 次

固垦对南汇东滩湿地大型底栖动物的影响·····	马长安,徐霖林,田伟,等 (1007)
基于 ArcView-WOE 的下辽河平原地下水生态系统健康评价·····	孙才志,杨磊 (1016)
京郊典型集约化“农田-畜牧”生产系统氮素流动特征·····	侯勇,高志岭,马文奇,等 (1028)
不同辐射条件下苹果叶片净光合速率模拟·····	高照全,冯社章,张显川,等 (1037)
藏北高原典型植被样区物候变化及其对气候变化的响应·····	宋春桥,游松财,柯灵红,等 (1045)
祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应·····	唐振兴,何志斌,刘鹄 (1056)
祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素·····	田凤霞,赵传燕,冯兆东,等 (1066)
呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应·····	尚建勋,时忠杰,高吉喜,等 (1077)
结合激光雷达分析上海地区一次连续浮尘天气过程·····	马井会,顾松强,陈敏,等 (1085)
福建中部近海浮游动物数量分布与水团变化的关系·····	田丰歌,徐兆礼 (1097)
香港巨牡蛎和长牡蛎幼虫及稚贝的表型性状·····	张跃环,王昭萍,闫喜武,等 (1105)
东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争特征·····	李慧,王江涛 (1115)
起始生物量比对 3 种海洋微藻种间竞争的影响·····	魏杰,赵文,杨为东,等 (1124)
不同磷条件下塔玛亚历山大藻氮的生态幅·····	文世勇,宋琍琍,龙华,等 (1133)
秦岭天然次生油松林冠层降雨再分配特征及延滞效应·····	陈书军,陈存根,邹伯才,等 (1142)
伊犁河谷北坡垂直分布格局及其与环境的关系——一种特殊的双峰分布格局·····	田中平,庄丽,李建贵 (1151)
濒危种四合木与其近缘种霸王水分关系参数和光合特性的比较·····	石松利,王迎春,周红兵,等 (1163)
干旱胁迫下黄土高原 4 种乡土禾草抗氧化特性·····	单长卷,韩蕊莲,梁宗锁 (1174)
施加角担子菌 B6 对连作西瓜土壤微环境和西瓜生长的影响·····	肖逸,王兴祥,王宏伟,等 (1185)
内蒙古典型草原区芨芨草群落适生境·····	张翼飞,王炜,梁存柱,等 (1193)
盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系·····	管孝艳,王少丽,高占义,等 (1202)
黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性·····	刘春利,胡伟,贾宏福,等 (1211)
松嫩平原玉米带农田土壤氮密度时空格局·····	张春华,王宗明,居为民,等 (1220)
小麦冬性强弱评价体系的建立·····	王鹏,张春庆,陈化榜,等 (1230)
唐家河自然保护区高山姬鼠和中华姬鼠夏季生境选择的比较·····	黎运喜,张泽钧,孙宜然,等 (1241)
西花蓟马在 6 种蔬菜寄主上的实验种群生命表·····	曹宇,鄧军锐,孔译贤 (1249)
同位素富集-稀释法研究食性转变对鱼类不同组织 N 同位素转化率的影响·····	曾庆飞,谷孝鸿,毛志刚,等 (1257)
基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别·····	许文雯,孙翔,朱晓东,等 (1264)
珠三角城市绿地 CO ₂ 通量的季节特征·····	孙春健,王春林,申双和,等 (1273)
污染场地地下水渗流场模拟与评价——以柘城县为例·····	吴以中,朱沁园,刘宁,等 (1283)
专论与综述	
湿地退化研究进展·····	韩大勇,杨永兴,杨杨,等 (1293)
绿洲农田氮素积累与淋溶研究述评·····	杨荣,苏永中,王雪峰 (1308)
问题讨论	
抗辐射菌 <i>Deinococcus radiodurans</i> 的多样性·····	屠振力,方俐晶,王家刚 (1318)
平茬措施对柠条生理特征及土壤水分的影响·····	杨永胜,卜崇峰,高国雄 (1327)
研究简报	
祁连山典型灌丛降雨截留特征·····	刘章文,陈仁升,宋耀选,等 (1337)
野生鸭儿芹种子休眠特性及破除方法·····	喻梅,周守标,吴晓艳,等 (1347)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 348 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-02	



封面图说: 遗鸥群飞来——遗鸥意即“遗落之鸥”(几乎是最后才被发现的新鸥种,因此得名)。1931 年,瑞典动物学家隆伯格撰文记述在中国额济纳采到了标本。1987 年,中国的鸟类学家在鄂尔多斯 的 桃力庙获得了一对遗鸥的标本。1990 年春夏之交,发现了湖心各岛上大量的遗鸥种群。近年来的每年夏季,大约全球 90% 以上的遗鸥都会到陕西省神木县境内的沙漠淡水湖-红碱淖上聚集。遗鸥——国家一级重点保护、CITES 附录一物种。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201012281863

管孝艳, 王少丽, 高占义, 吕 焱, 付小军. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系. 生态学报, 2012, 32(4): 1202-1210.

Guan X Y, Wang S L, Gao Z Y, Lv Y, Fu X J. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1202-1210.

盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其 与地下水埋深的关系

管孝艳^{1,2,*}, 王少丽^{1,2}, 高占义^{1,2}, 吕 焱^{1,2}, 付小军³

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048; 3. 内蒙古河套灌区解放闸灌域沙壕渠试验站, 陕坝 015400)

摘要: 土壤盐分空间变异特征和地下水埋深状况是指导灌区合理用水和防治土壤盐碱化的重要依据。运用经典统计学和地质统计学方法, 结合 GIS 技术, 分析了河套灌区沙壕渠灌域 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 土壤 EC 值的空间变异特征及地下水埋深对土壤盐分分布的影响。结果表明: 沙壕渠灌域土壤盐分 C_v 值在不同灌溉时期和不同土壤深度均大于 36%, 表现为强变异特征; 各灌水时期和不同土壤深度土壤 EC 值均表现为中等强度的空间自相关性, 表层 0—20 cm 土壤空间自相关程度最高; 秋浇前不同层次土壤 EC 值的空间分布在灌域内从南到北呈增大趋势, 秋浇后土壤含盐量的高值区在西北部或东北部; 土壤盐分受地下水埋深影响显著, 灌域内地下水埋深南深北浅, 土壤盐分随地下水埋深的增大而减小, 二者之间满足指数关系。因此, 应采取合理措施控制地下水埋深, 防止区域土壤盐渍化加剧。

关键词: 盐渍化灌区; 土壤盐分; 时空变异; 地下水埋深

Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district

GUAN Xiaoyan^{1,2,*}, WANG Shaoli^{1,2}, GAO Zhanyi^{1,2}, LV Ye^{1,2}, FU Xiaojun³

1 State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

2 National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing 100048, China

3 Shahaoqu Experiment Station of Hetao Irrigation District, Shanba 015400, China

Abstract: The spatial distribution of soil salinity and the depth to groundwater are of great importance in guiding rational irrigation water use and controlling soil salinization. The secondary saline-alkalization problem of soil is quite severe in Hetao irrigation, Inner Mongolia due to increasing rise of groundwater table caused by unsuitable irrigation method and incomplete drainage system, in particular under the specific arid and semi-climatic and hydrogeological conditions. This has become one of the major constraints to local agricultural and social-economic development. In this paper, the Shahaoqu irrigation district was chosen as an example for testing the spatial variability of soil salinity and its relationship to depth to groundwater. Aiming at the complexity and spatial variability of the dynamic soil water and salinity in Shahaoqu irrigation district, the classical statistics and geostatistics integrated with GIS were used in this study to analyze the spatial variability of soil EC values in 0—20cm, 20—40cm and 40—60cm depths and the effect of the depth to groundwater on soil salinity distribution in Shahao irrigation area of Hetao irrigation district. The results showed that the soil EC's C_v values were all

基金项目: 中美国际科技合作资助项目 (2009DFA71850); 国家自然科学基金资助项目 (51009152, 51079162, 51109227); 水利部“948”资助项目 (201119) 和中国水利水电科学研究院科研专项资助项目 (JSJ1005)

收稿日期: 2010-12-28; 修订日期: 2011-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guanxy@iwhr.com

more than 36% in Shahao irrigation area and had strong spatial variability in different irrigation periods and different soil depths, Analysing the EC data with GS+ software, it was found that the spherical model, gaussian model and exponential model were perfect in fitting Semi-variogram of soil EC values, the soil EC data had moderate spatial correlation, and the spatial autocorrelation of soil EC values reached the highest in 0—20cm. After finishing the Kriging map of salt in three soil layer respectively, it was found that the spatial distribution of soil EC values was in a trend of increase from south to north in different soil depths before autumn irrigation, and the high soil EC values were in northwest or northeast areas after autumn irrigation. Soil salinity is significantly affected by the depth to groundwater in Hetao irrigation district, and the depth to groundwater is a decisive factor affecting soil salinization. From the Kriging map of the depth to groundwater, it was found that the depth to groundwater was deep in the south and shallow in the north, and it reached the deepest 2.71m on the average before autumn irrigation. However, the average depth to groundwater reached the shallowest 0.75m after autumn irrigation due to groundwater recharge from irrigation water. Soil salinity decreases with the increase of the depth to groundwater, they conform to exponential relations. In order to prevent the soil salinity from accumulating in the root layer, controlling the depth to groundwater is an important factor for controlling soil salinization in Hetao irrigation district. Therefore, some reasonable irrigation measures and agriculture technology measures should be adopted to control the depth to groundwater, and thereby to prevent the aggravation of soil salinization in this irrigation area. This study could provide lots of scientific support for soil salinity treatment and improvement, agricultural planning and adjustment, and irrigation and drainage engineering planning in the future.

Key Words: salinization irrigation district; soil salinity; spatio-temporal variability; the depth to groundwater

随着人类活动对全球环境变化影响的加剧和粮食需求的日益紧张以及耕地资源的日趋匮乏,土壤盐渍化已严重影响了现代农业的可持续发展^[1-3]。在地下水埋深较浅的我国北方干旱半干旱盐渍化灌区,由于传统的灌溉农业引起地下水水位的抬高,加之干旱的气候条件,土壤水分和潜水强烈蒸发,土壤次生盐渍化危害尤为突出^[4-5]。土壤盐分的时空变异性与地下水埋深之间的关系在一定程度上反映了土壤耕作层内的盐渍化程度和状态^[6],掌握其变异性与分布规律对于指导农业生产、提高农作物产量等具有十分重要的现实意义。

近年来,地质统计学与 GIS 技术日益成为研究土壤特性时空变异规律的有效手段^[7-8],国内外许多学者将地统计学用于研究地下水盐分和埋深的空间变异性中,在土壤盐分空间变异方面的研究也取得了一些进展。Panagopoulos 等将地质统计学与 GIS 技术相结合对地中海地区面积为 2208 m²的区域进行了土壤盐分变异性研究,并对 Kriging 插值方法进行了探讨,为农业生产管理提供了理论依据^[9]。Eldeiry 等^[10]将地理信息系统和遥感以及空间模型相结合,将最小二乘法模型、空间自回归模型和改进的 Kriging 模型应用于土壤盐碱化的遥感估算,结果表明具有较强统计特征的地理信息系统和遥感相结合,能够提高土壤盐碱化空间分布特征的研究精度。陈亚新、史海滨等^[4-5]运用地质统计学及非参数统计理论,对河套灌区土壤水盐空间变异性预测、条件模拟和变异函数稳健估计方法等进行了较全面、深入的研究。阮本清^[11]利用地质统计学模型对宁夏青铜峡灌区地下水位埋深的时空变异的规律进行了探索。土壤盐渍化与地下水埋深关系密切,现有研究成果表明^[12-13]:浅层地下水埋深位 1.5—2.5 m 时,有利于作物生长,但从控制土壤盐碱化的角度看,地下水埋深宜控制在 2.0 m 左右。地下水的矿化度对土壤积盐也具有较大影响,姚江荣^[14]运用 GIS 和地统计学的原理与方法从空间尺度对各分区地下水矿化度与耕层土壤积盐规律进行了定量分析,表明耕层土壤积盐与地下水矿化度呈极显著的相关关系。杜军等^[15]研究了河套灌区年内地下水埋深与矿化度的时空变化,指出在特定区域浅层地下水埋深的时空分布规律能够定性反映矿化度的时空分布规律。因此,地下水埋深对土壤盐渍化具有明显的影响作用。总体上,土壤盐分空间变异性研究取得了一些重要的研究成果,为农业管理、生产提供了理论指导,但是目前较多的是分别对土壤盐分和地下水埋深的空间变异性进行研究^[16],但从时空变异的角对河套灌区地下水埋深与土壤盐渍化进行的研究还不多见。

本文采用地质统计学与 GIS 相结合的方法对河套灌区沙壕渠灌域的土壤盐分在不同季节的空间变异特征及其与地下水埋深的关系进行研究,以期对灌区农业水资源的合理利用和土壤盐碱化防治提供理论支持。

1 研究区域概况

试验区沙壕渠灌域位于内蒙古河套灌区解放闸灌域中东部(图 1),属黄济渠灌域中游的分干渠灌排系统。近似为一狭长的三角形,南北平均长为 15 km,东西平均宽约 4.0 km,总控制面积 $4.93 \times 10^3 \text{ km}^2$,其中农田灌溉面积 $3.47 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。地处干旱、半荒漠草原地带,冬季严寒少雪,夏季高温干热,降雨稀少、蒸发量大,无霜期短,土壤封冻期长,温差大,为典型的大陆性气候、季节性冻土地区。年平均降雨量 139—222 mm,5—9 月份降水量占全年的 72.6%,年平均蒸发量 1999—2346 mm,5—7 月蒸发量最大,占全年 50% 以上,年均蒸发是年降水的 13.6 倍,春季比值可达 36.3 倍,土壤冻结期始于 11 月下旬,冻层深度 100—150 cm,冻结至融通历时 180 余天。

2 数据来源与分析方法

2.1 数据来源

沙壕渠灌域在全灌域均匀布置了 19 眼长期地下水观测井测定地下水埋深,并同时对该点的土壤进行分层取样,为获得更加精确的土壤盐分分布,在整个灌域范围内加设 30 个土壤盐分监测点,每个点采用 GPS 定位。采样时间为 2009 年的五水前(7 月 21 日)、秋浇前(9 月 10 日)和秋浇后(11 月 12 日)3 个时期(河套灌区全年共灌水八次),土壤盐分的采样深度分别为 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm。地下水位埋深用皮尺测定,土壤盐分 EC 值测定过程为:称取过 2 mm 筛的风干土试样 50—100 g,按土水比 1:5 配制土壤饱和浸提液,采用 DDS-307 型电导率仪测定土壤 EC 值。

2.2 分析方法

本研究采用地质统计学方法进行空间变异性分析,地质统计学是基于区域化变量,借助变异函数研究具有空间相关性和依赖性的自然现象的一种分析方法。采用克里格插值(kriging)对未测点进行插值估计,克里格插值是以变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法,其实质是利用区域化变量的原始数据和变异函数的结构特点,对未知样点进行线性无偏、最优估计^[17-19]。

设 $Z(x_1)$, $Z(x_2)$, $\dots$, $Z(x_n)$ 是样本数据系列值,在固有假设条件下,即:

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = 0$$

$$E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} = 2\gamma(h)$$

样本的变异函数值 $\gamma^*(h)$ 通过下式进行计算:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_h} [Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2 \quad (1)$$

式中, h 为分离距离, N_h 表示在 (x_i+h, x_i) 之间计算样本变异函数值的样本对数。然后选取适当的理论模型

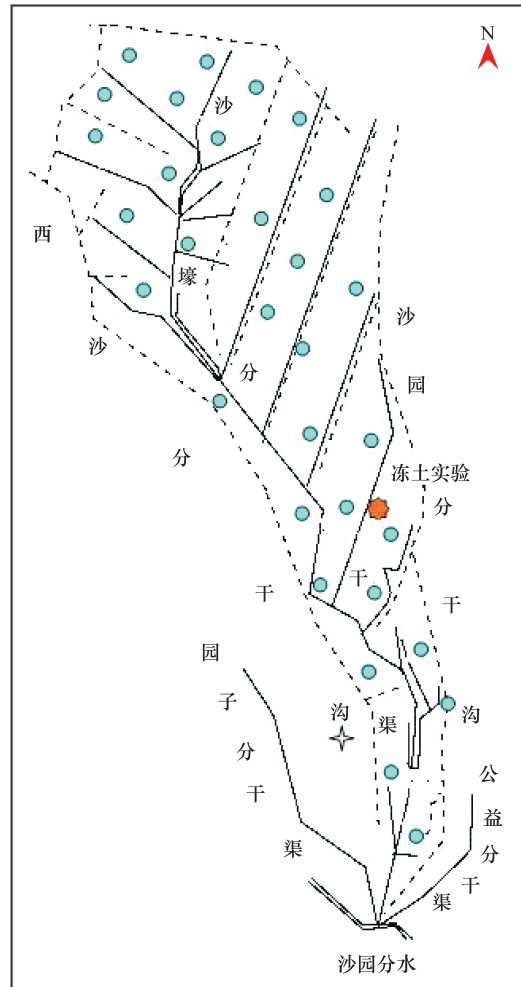


图 1 研究区域位置示意图

Fig. 1 Location of the research area

对变异函数进行拟合,得到变异函数模型。

采用 SPSS17.0 软件进行土壤盐分和地下水埋深的统计分析,变异函数模型的拟合采用地学统计软件 GS +5.0,各土层土壤 EC 值、地下水位埋深的空间插值与图形绘制采用 ArcGIS9.2 软件。

3 结果与分析

3.1 土壤盐分的统计特征

按照经典统计学方法分析,样本的标准差对平均数的百分数为样本的变异系数(C_v),在某种程度上它可以反映样本的变异程度,在土壤科学中,根据 C_v 值可以对土壤性质的变异程度进行分类: C_v 值在 0—15% 为弱变异,16%—35% 为中等变异,大于 36% 为强变异。 C_v 值对于估计结果可以提供一些预警信息, C_v 值大于 100% 标识存在一些特别大的样本值,他们对变量的估计有很大的影响^[7,20]。

通过对土壤盐分的统计结果分析(表 1)可知,沙壕渠灌域在不同灌溉时期和不同土壤深度的土壤盐分 C_v 均大于 36%,表现为强变异特征,尤其秋浇前和秋浇后表层 0—20 cm 土壤盐分 C_v 大于 100%,变异性最强,表明数据受较大土壤盐分 EC 值的数据影响。从不同灌溉时期来看,就其平均水平而言,空间变异强度秋浇后最大,五水前最小,从不同土壤深度来看,随着土壤深度的增大,土壤 EC 值的空间变异程度减小,这主要是受秋浇洗盐影响,土壤盐分降低,由于淋洗时间不一致、淋洗水量不均匀及盐荒地干排盐等原因,导致不均匀性进一步提高。同时表层土壤由于受人类活动影响大,因而其变异系数也最大。

表 1 土壤 EC 值的统计分析结果

Table 1 Descriptive statistics of EC value of soil

时间 Time	深度 Depth /cm	均值 Mean	标准差 Standard deviation	最大值 Maximum	最小值 Minimum	样本方差 Sample variance	变异系数 Coefficient of variation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S 检验系数 K-S inspection coefficient
五水前	0—20	0.889	0.747	2.98	0.04	0.558	0.84	0.73	-0.44	0.403
Before the fifth	20—40	0.574	0.403	1.64	0.09	0.163	0.70	0.77	-0.39	0.410
irrigation	40—60	0.454	0.273	1.11	0.10	0.074	0.60	0.63	-0.64	0.630
秋浇前	0—20	0.805	0.932	4.27	0.10	0.868	1.16	1.85	3.10	0.516
Before autumnal	20—40	0.498	0.393	1.68	0.09	0.155	0.79	1.30	0.94	0.880
irrigation	40—60	0.373	0.244	1.06	0.08	0.059	0.65	1.11	0.58	0.546
秋浇后	0—20	0.604	0.829	4.63	0.10	0.687	1.37	3.27	11.51	0.329
After autumnal	20—40	0.450	0.401	1.44	0.07	0.161	0.89	1.38	0.69	0.659
irrigation	40—60	0.504	0.386	1.51	0.06	0.149	0.77	1.03	-0.06	0.833

3.2 土壤盐分半方差函数的结构分析

半方差函数是地质统计学解释土壤特性空间变异结构的理论基础^[7]。 C_0 表示块金效应, C_0+C_1 表示基台值,滞后距表示参数的空间变异特性,如某变量观测值之间的距离大于该值时,则说明他们之间相互独立,若小于该值时,则说明他们之间存在一定的相关关系;各土壤特性参数的空间相关性可根据块金值与基台值之比 $C_0/(C_0+C_1)$ 来划分,该比值高,说明由随机部分一起的空间变异性程度较大,相反则由结构性因素引起的空间变异性程度较大。当 $C_0/(C_0+C_1) < 25\%$, 变量具有强烈的空间相关性; $C_0/(C_0+C_1)$ 在 25%—75% 之间,变量具有中等的空间相关性,而当 $C_0/(C_0+C_1) > 75\%$ 时,变量空间相关性很弱^[21-22]。

根据 3.2 中半方差函数理论模型的确定方法,土壤 EC 值的半方差函数模型和有关参数如表 2 所示,半方差函数图如图 2 所示。

由表 2 和图 1 可知,五水前 0—20 cm、秋浇前 20—40 cm 土壤 EC 值可以用球状模型拟合,五水前 20—40 cm、40—60 cm、秋浇后 20—40 cm 土壤 EC 值可用高斯模型拟合,其他各层土壤 EC 值可以用指数模型拟合。从空间自相关性来看,各灌水时期和不同土壤深度土壤 EC 值的 $C_0/(C_0+C_1)$ 在 25%—75% 之间,表明土壤

EC 值均为中等强度的空间自相关性,相比而言,表层土壤空间自相关程度最高。土壤盐分空间变异由上层到下层逐渐减小。结构性变异引起的变异占总空间变异的的比例较灌溉中期都有所增大,造成土壤盐分不均匀性的因素主要为区域结构性因素,而秋浇前灌溉、施肥和中耕等农业措施对土壤盐分空间变异性的影响减弱,没有达到破坏原有空间格局的程度。从变程来看,秋浇后较秋浇前都增大;由表层到下层,空间自相关尺度逐渐减小,空间相关性减弱,反映在空间分布图上,表层土壤的空间分布格局更加连续和均匀。

表 2 土壤 EC 值的半方差函数模型及其参数

Table 2 Semi-variogram types of soil EC value and their parameters

时间 Time	深度 Depth /cm	理论模型 Theoretical model	C_0	C_0+C	$C/(C_0+C)$	变程 Range /m	R^2	RSS
五水前	0—20	球状模型	0.413	0.827	0.501	3013	0.024	0.115
Before the fifth	20—40	高斯模型	0.565	1.131	0.500	2267	0.058	0.0789
irrigation	40—60	高斯模型	0.068	0.136	0.500	1831	0.139	9.578×10^{-4}
秋浇前	0—20	指数模型	0.887	2.015	0.560	3257	0.531	0.144
Before autumnal	20—40	球状模型	0.464	0.929	0.501	2863	0.672	0.0235
irrigation	40—60	指数模型	0.353	0.457	0.501	2162	0.281	0.0209
秋浇后	0—20	指数模型	0.528	1.104	0.522	3920	0.899	0.013
After autumnal	20—40	高斯模型	0.649	1.299	0.500	3150	0.02	0.061
irrigation	40—60	指数模型	0.508	1.530	0.518	2499	0.446	0.0491

R^2 是 Regression coefficient of determination 回归系数, RSS 是 Residual sums of squares 残差平方和

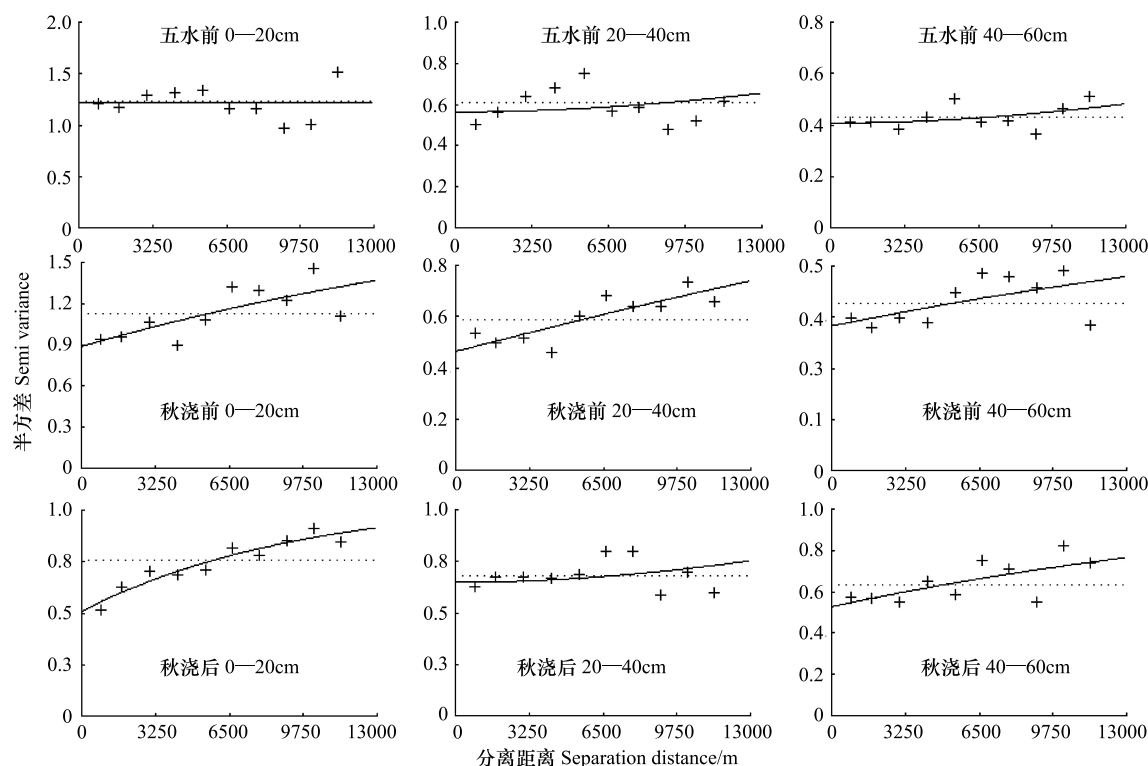


图 2 土壤 EC 值的半方差函数图

Fig. 2 Semi-variogram of soil EC value

3.3 土壤盐分和地下水埋深的空间格局

根据前面得到的土壤 EC 值的半方差函数模型,利用 ArcGIS 绘制了沙壕渠灌域土壤 EC 值的空间分布图

(图3)。由图可知,五水前0—20 cm和20—40 cm土壤EC值空间分布特征较复杂,空间分布呈条带状,40—60 cm土壤EC值分布较为连续,0—40 cm土壤EC值分布图中灌域中部和北部部分区域EC值偏高;秋浇前不同层次土壤盐分含量的空间分布规律相似,灌域南部土壤盐分含量最小,从南到北含盐量呈增大的趋势,到

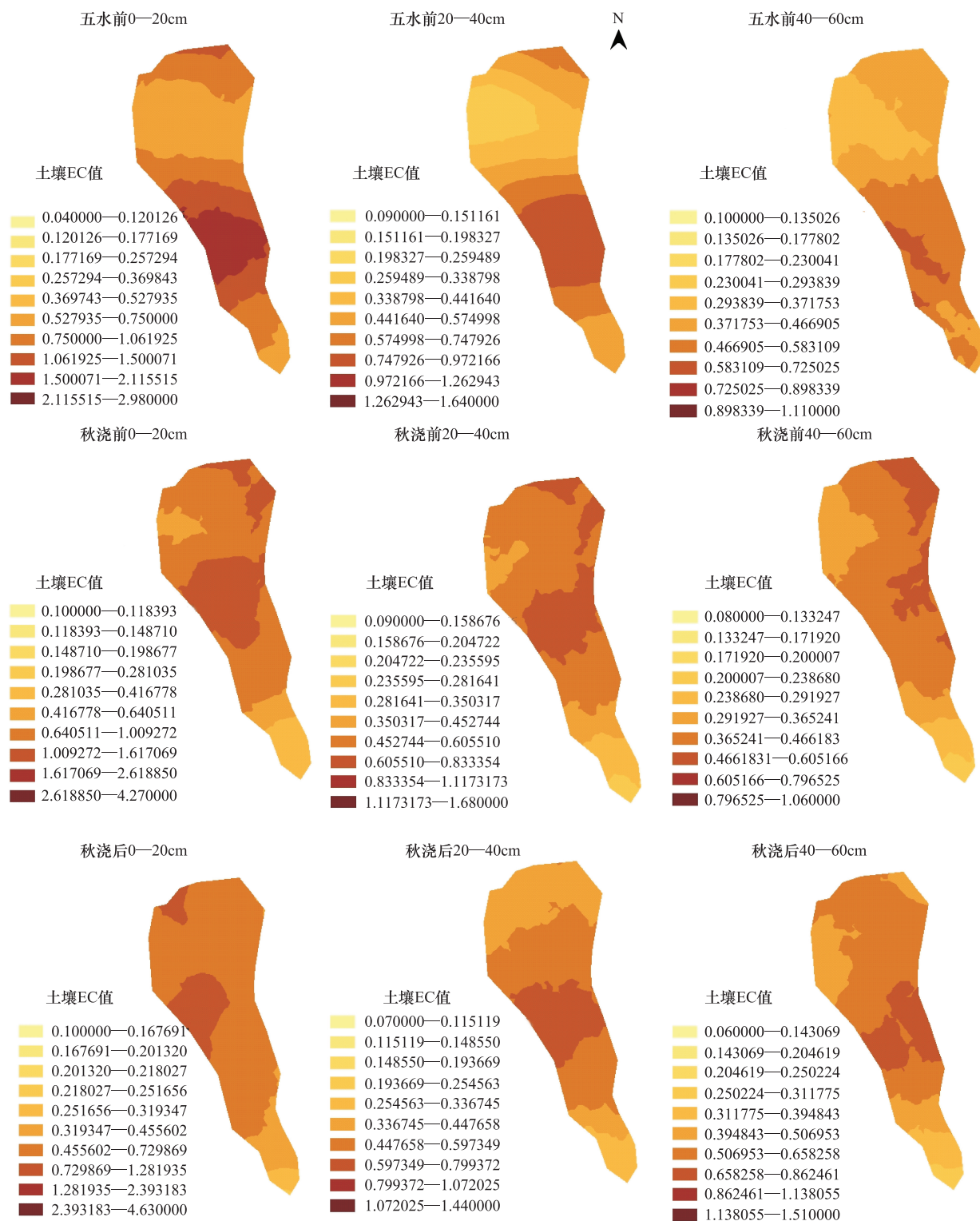


图3 土壤EC值空间分布

Fig.3 Spatial distribution of soil EC value

灌域东北部达到最大值;秋浇后灌域土壤含盐量的高值区仍在西北部或东北部,0—20 cm 土壤盐分在灌域中西部达到最大值,20—60 cm 土壤盐分在灌域中部达到最大值。由于灌域下游秋浇灌水晚,由于土壤冻结导致土壤盐分未得到充分淋洗;同时,土壤盐分在秋浇灌水过程中向下游转移,在沟渠出口两侧形成了土壤 EC 的高值区域。

根据地下水埋深数据的插值结果,得到地下水埋深的空间分布图(图 4)。由图可知,由于灌域地形为南高北低,灌溉水和地下水径流流向均为由南到北,并形成了区域地下水埋深南深北浅的格局。秋浇前地下水埋深最大,灌域平均约 2.71 m,五水前地下水埋深次之,灌域平均约 2.05 m,秋浇后地下水埋深最小,灌域平均约 0.75 m。灌域上游地下水埋深最大,这主要由于灌域上游为杭锦后旗陕坝镇所在地,工业、人畜用水较大,地下水有部分开采。在灌域下游部分区域的地下水埋深较大,这主要是因为该区域在灌溉时由于地势原因,黄河引水量无法满足本地区灌溉,采用抽取地下水灌溉导致。秋浇时期,由于引水量的加大,秋浇对地下水的补给作用十分明显,地下水埋深达到年内最小值。

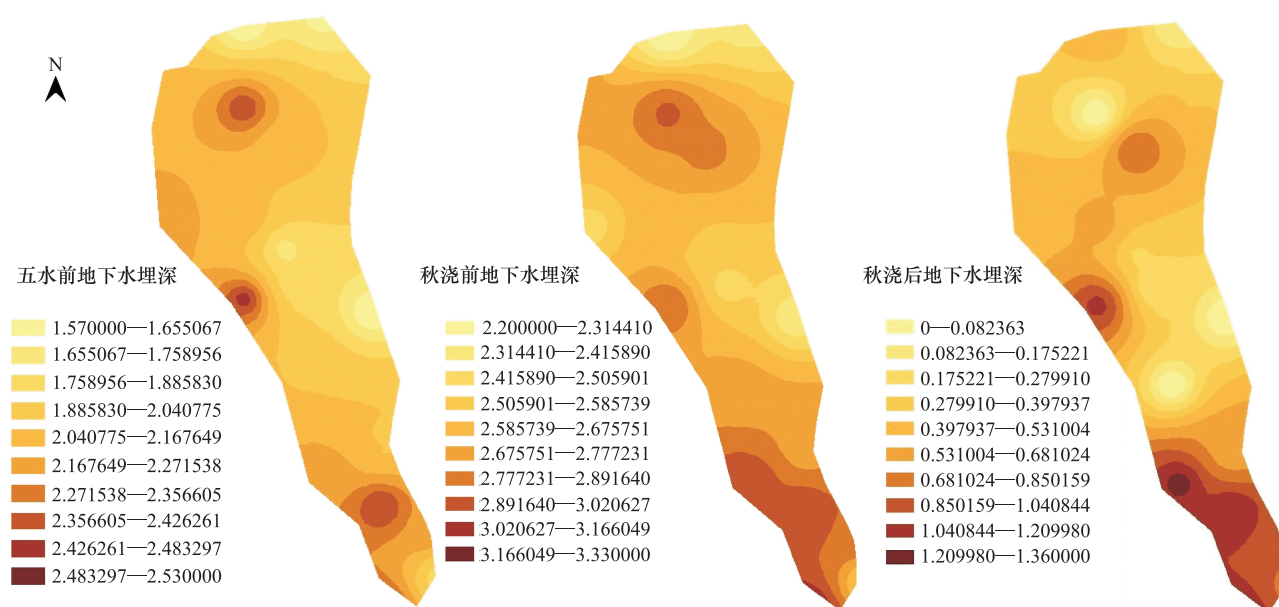


图 4 地下水埋深空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of groundwater depth

3.4 地下水埋深对土壤盐渍化的影响

研究表明土壤盐分含量和土壤盐渍化状况受地下水位及地下水矿化度的控制和影响最大,地下水埋深是土壤发生盐渍化的一个决定性条件^[11,23]。由图 3 和图 4 可知,土壤盐分与地下水埋深有着紧密的联系^[16],地下水位埋深愈浅,蒸发量越大,土壤积盐越严重,地下水位埋深较深的区域土壤盐分含量低。这说明沙壕渠灌域地下水埋深状况制约着土壤含盐量,“盐随水来,盐随水去”,土壤盐分主要通过潜水蒸发由地下水带至土壤耕层。地下水位较浅,即使地下水盐分含量较少,由于蒸发进入土壤中的水分较多也会携带较多的盐分,使土壤积盐。因此,只有将地下水控制在不致因蒸发而使土壤积盐的深度,土壤才不会发生盐渍化。

选取灌域内 19 眼地下水观测井的浅层地下水埋深与土壤盐分数据来分析二者之间的关系(图 5)。由图可知,土壤盐分随浅层地下水埋深的增大而减小,二者之间满足指数关系,且二者的相关性较好, $R^2 > 0.93$ 。当地下水埋深在 0—1.5 m 时,且随着土壤深度的增大,土壤盐分的变化趋势减小;当地下水埋深超过 1.5 m 时,对不同土壤深度土壤盐分的变化影响较小,当地下水埋深大于 1.5 m 时,土壤电导率小于 0.8 ms/cm,根据作物的耐盐程度^[24],对玉米和小麦等影响较小,基本不会造成作物的减产。但是关于如何控制地下水埋深的临界深度,保证不影响作物生长和不加剧土壤盐碱化,还需考虑及气候、土壤、作物耐盐、水文地质、人为因

素以及灌水季节等的综合影响,受数据量限制,本研究只探讨地下水埋深与土壤盐分的关系。此外,由于秋浇期灌水量较大,导致地下水埋深变浅,对翌年土壤盐分增大影响较大,因此,在保证秋浇洗盐的同时,应尽可能减少秋浇水量,这将有利于控制土壤盐碱化的发展。

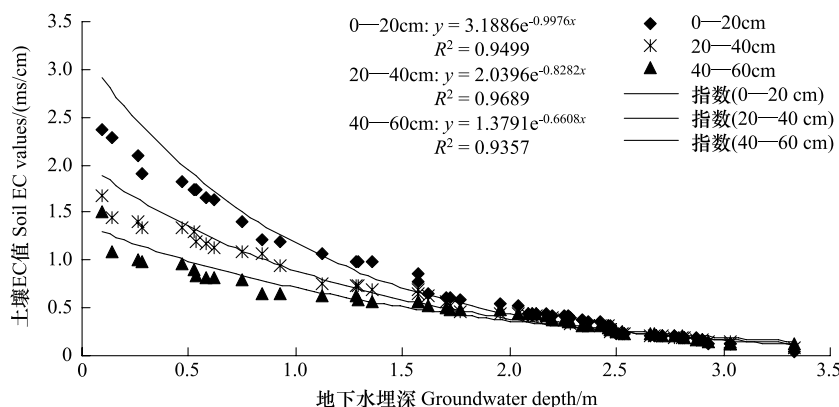


图5 地下水埋深与土壤 EC 值的关系

Fig. 5 Relationship between groundwater depth and soil EC values

土壤盐分的空间变异性与地下水埋深的空间分布密切相关^[3-4,14],因此,在河套灌区为了保持根系层土壤不积盐,控制农田土壤盐渍化的一个重要因素是控制灌区地下水埋深,而农业生产活动频繁,作物类型、施肥措施和灌溉水量及时间差异也是影响土壤盐分和地下水埋深的重要因素。但是河套灌区地下水埋深较浅、地下径流不畅,大水漫灌使地下水埋深变浅,由于地下水含有较多可溶性盐,在蒸发量大于降水量的条件下,使土壤表层盐分增加,引起土壤盐化。防治的关键在于控制地下水位,故应健全灌排系统,采取合理灌溉等农业技术措施,防止地下水位抬升和土壤返盐^[25]。但灌区要求的地下水埋深是随季节变化而变化的,在控制灌区内地下水埋深也不是控制灌区土壤盐碱化的唯一标准,还应结合其他土壤改良方法,多渠道联合控制土壤的盐碱化。

4 结论

(1) 沙壕渠灌域在不同灌溉时期和不同土壤深度的土壤盐分表现为强变异特征, C_v 均大于36%,由于受到秋浇淋洗不均匀的影响,秋浇后土壤盐分 EC 值的空间变异强度最大,表层土壤由于受人类活动影响大,变异系数也最大,随着土壤深度的增大,土壤 EC 值的空间变异程度减小。

(2) 从空间自相关性来看,各灌水时期和不同土壤深度土壤 EC 值的 $C_0/(C_0+C_1)$ 在25%—75%之间,表明土壤 EC 值均为中等强度的空间自相关性,土壤盐分空间变异性由上层到下层逐渐减小,从变程来看,随着土壤深度的增大,土壤盐分空间自相关尺度逐渐减小,空间相关性减弱,表层土壤的空间分布格局连续且均匀。

(3) 五水前0—40 cm 土壤 EC 值空间分布呈条带状,秋浇前不同层次土壤盐分含量的空间分布规律相似,从南到北含盐量呈增大的趋势,秋浇后灌域土壤含盐量的高值区在西北部或东北部,0—20 cm 土壤盐分在灌域中西部达到最大值,20—60 cm 土壤盐分在灌域中部达到最大值。由于土壤盐分在秋浇灌水过程中向下游转移,在沟渠出口两侧形成了土壤 EC 的高值区域。区域地下水埋深南深北浅,由于引水量的加大,秋浇对地下水的补给作用十分明显,地下水埋深达到年内最小值灌域平均约0.75 m。

(4) 土壤盐分与地下水埋深有着紧密的联系,土壤盐分随浅层地下水埋深的增大而减小,二者之间满足指数关系,沙壕渠灌域地下水埋深状况制约着土壤含盐量,为了保持根层土壤不积盐,控制农田土壤盐渍化的一个重要因素是控制灌区地下水埋深,应健全灌排系统,采取合理灌溉等农业技术措施,防止地下水位抬升和土壤返盐。

References:

- [1] Schoups G, Hopmans J W, Yong C A, Vrugt J A, Wallender W W, Tanji K K, Panday S. Sustainability of irrigated agriculture in the San Joaquin Valley, California. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(43): 15352-15356.
- [2] Darwish T, Atallah T, El-Moujabber M, Khatib N. Salinity evolution and crop response to secondary soil salinity in two agro-climatic zones in Lebanon. *Agricultural Water Management*, 2005, 78(1/2): 152-164.
- [3] Gao T T, Ding J L, Ha X P, Zhang F, Wang F. The spatial variability of salt content based on river basin scale: a case study of the delta oasis in Weigan-Kuqa Watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2695-2705.
- [4] Chen Y X, Shi H B, Wei Z M. Prediction Theory and Condition Simulation of Spatial Variability of Soil Water-Salt Information. Beijing: Science Press, 2005: 3-4.
- [5] Xu Y, Chen Y X, Shi H B, Wei Z M. Scale effect of spatial variability of soil water-salt. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(2): 1-5.
- [6] Douaik A, van Meirvenne M, Tóth T. Statistical methods for evaluating soil salinity spatial and temporal variability. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(5): 1629-1635.
- [7] Zhang R F. Theory and Application of Spatial Variability. Beijing: Science Press, 2005: 13-14.
- [8] Gunter B. Geostatistics for environmental scientists. *Vadose Zone Journal*, 2001, 1: 321-322.
- [9] Panagopoulos T, Jesus J, Antunes M D C, Beltrão J. Analysis of spatial interpolation for optimising management of a salinized field cultivated with lettuce. *European Journal of Agronomy*, 2006, 24(1): 1-10.
- [10] Eldeiry A A, Garcia L A. Detecting soil salinity in alfalfa fields using spatial modeling and remote sensing. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(1): 201-211.
- [11] Ruan B Q, Xu F R, Jiang R F. Analysis on spatial and temporal variability of groundwater level based on spherical sampling model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(5): 573-579.
- [12] Luo J M, Wang Y J, Deng W, Ye Y J, Zhang X P. Mechanism of salt-accumulation in micro-scale sodic saline soil as affected by shallow groundwater table. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(2): 238-245.
- [13] Rudzianskaite A, Sukys P. Effects of groundwater level fluctuation on its chemical composition in karst soils of Lithuania. *Environmental Geology*, 2008, 56(2): 289-297.
- [14] Yao R J, Yang J S. Quantitative analysis of spatial distribution pattern of soil salt accumulation in plough layer and shallow groundwater in the Yellow River Delta. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(8): 45-51.
- [15] Du J, Yang P L, Li Y K, Ren S M, Zhang J G, Hou Z Q, Li X Y. Analysis of spatial and temporal variations of groundwater level and its salinity in Hetao Irrigation District. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(7): 26-31.
- [16] Jordán M M, Navarro-Pedreño J, García-Sánchez E, Mateu J, Juan P. Spatial dynamics of soil salinity under arid and semi-Arid conditions: geological and environmental implications. *Environmental Geology*, 2004, 45(4): 448-456.
- [17] Liu X N, Huang F, Wang P. Spatial Analysis Principle and Method of GIS. Beijing: Science Press, 2008: 199-206.
- [18] Miyamoto S, Chacon A, Hossain M, Martinez L. Soil salinity of urban turf areas irrigated with saline water I. Spatial variability. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 71(2/4): 233-241.
- [19] She D L, Shao M A, Yu S G. Spatial Variability of Soil Water Content on a Cropland-grassland Mixed Slope Land in the Loess Plateau, China. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(7): 57-63.
- [20] Zhuang L, Chen Y N, Li W H, Lu X. Responses of Tamarix ramosissima ABA Accumulation to groundwater level and soil salt changes in the lower reaches of Tarim River. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4247-4251.
- [21] Wang Y G, Xiao D N, Li Y. Spatial heterogeneity of soil salinity in oasis at catchment scale. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5262-5270.
- [22] Corwin D L, Lesch S M, Oster J D, Kafka S R. Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma*, 2006, 131(3/4): 369-387.
- [23] Shouse P J, Goldberg S, Skaggs T H, Soppe R W O, Ayars J E. Effects of shallow groundwater management on the spatial and temporal variability of boron and salinity in an irrigated field. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5(1): 377-390.
- [24] Rhoades J D, Chanduvi F, Lesch S. Soil salinity assessment: methods and interpretation of electrical conductivity measurements. *Irrigation and Drainage Paper No 57*. Rome: Food and Agriculture Organization, 1999: 11-14.
- [25] Abdelfattah M A, Shahid S A, Othman Y R. Soil salinity mapping model developed using RS and GIS — a case study from Abu Dhabi, United Arab Emirates. *European Journal of Scientific Research*, 2009, 26(3): 342-351.

参考文献:

- [3] 高婷婷, 丁建丽, 哈学萍, 张飞, 王飞. 基于流域尺度的土壤盐分空间变异特征——以渭干河-库车河流域三角洲绿洲为例. *生态学报*, 2010, 30(10): 2695-2705.
- [4] 陈亚新, 史海滨, 魏占民. 土壤水盐信息空间变异的预测理论与条件模拟. 北京: 科学出版社, 2005: 3-4.
- [5] 徐英, 陈亚新, 史海滨, 魏占民. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 1-5.
- [7] 张仁铎. 空间变异理论及应用. 北京: 科学出版社, 2005: 13-14.
- [11] 阮本清, 许凤冉, 蒋任飞. 基于球状模型参数的地下水水位空间变异特性及其演化规律分析. *水利学报*, 2008, 39(5): 573-579.
- [12] 罗金明, 王永洁, 邓伟, 叶雅杰, 张晓平. 浅地下水埋深微域尺度苏打盐渍土的积盐机理探讨. *土壤学报*, 2010, 47(2): 238-245.
- [14] 姚荣江, 杨劲松. 黄河三角洲地区浅层地下水与耕层土壤积盐空间分异规律定量分析. *农业工程学报*, 2007, 23(8): 45-51.
- [15] 杜军, 杨培岭, 李云开, 任树梅, 张建国, 侯志强, 李仙岳. 河套灌区年内地下水埋深与矿化度的时空变化. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 26-31.
- [17] 刘湘南, 黄方, 王平. GIS 空间分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2008: 199-206.
- [19] 余冬立, 邵明安, 俞双恩. 黄土区农草混合利用坡面土壤水分空间变异性. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 57-63.
- [20] 庄丽, 陈亚宁, 李卫红, 吕新. 塔里木河下游怪柳 ABA 累积对地下水位和土壤盐分的响应. *生态学报*, 2007, 27(10): 4247-4251.
- [21] 王玉刚, 肖笃宁, 李彦. 流域尺度绿洲土壤盐分的空间异质性. *生态学报*, 2007, 27(12): 5262-5270.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 4 February, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

The influence of a reclamation project on the macrobenthos of an East Nanhui tidal flat	MA Changan, XU Linlin, TIAN Wei, et al (1007)
Ecological health assessment of groundwater in the lower Liaohe River Plain using an ArcView-WOE technique	SUN Caizhi, YANG Lei (1016)
Nitrogen flows in intensive “crop-livestock” production systems typically for the peri-urban area of Beijing	HOU Yong, GAO Zhiling, MA Wenqi, et al (1028)
The simulation of leaf net photosynthetic rates in different radiation in apple canopy	GAO Zhaoquan, FENG Shezhang, ZHANG Xianchuan, et al (1037)
Phenological variation of typical vegetation types in northern Tibet and its response to climate changes	SONG Chunqiao, YOU Songcai, KE Linghong, et al (1045)
Soil moisture and temperature characteristics of forest-grassland ecotone in middle Qilian Mountains and the responses to meteorological factors	TANG Zhenxing, HE Zhibin, LIU Hu (1056)
Eco-hydrological effects of Qinghai spruce (<i>Picea crassifolia</i>) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains	TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong, et al (1066)
Response of tree-ring width of <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> to climate change in Hulunbuir sand land, China	SHANG Jianxun, SHI Zhongjie, GAO Jixi, et al (1077)
Analysis of a dust case using lidar in Shanghai	MA Jinghui, GU Songqiang, CHEN Min, et al (1085)
Relating the distribution of zooplankton abundance in the coastal waters of central Fujian Province to the seasonal variation of water masses	TIAN Fengge, XU Zhaoli (1097)
Phenotypic traits of both larvae and juvenile <i>Crasstrea hongkongensis</i> and <i>C. gigas</i>	ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (1105)
Inter-specific competition between <i>Prorocentrum donghaiense</i> and <i>Skeletonema costatum</i>	LI Hui, WANG Jiangtao (1115)
Effects of initial biomass ratio on the interspecific competition outcome between three marine microalgae species	WEI Jie, ZHAO Wen, YANG Weidong, et al (1124)
On the ecological amplitude of nitrate of <i>Alexandrium tamarense</i> at different initial phosphate concentrations in laboratory cultures	WEN Shiyong, SONG Lili, LONG Hua, et al (1133)
Time lag effects and rainfall redistribution traits of the canopy of natural secondary <i>Pinus tabulaeformis</i> on precipitation in the Qinling Mountains, China	CHEN Shujun, CHEN Cungen, ZOU Bocai, et al (1142)
The vertical distribution of vegetation patterns and its relationship with environment factors at the northern slope of Ili River Valley: a bimodal distribution pattern	TIAN Zhongping, ZHUANG Li, LI Jianguai (1151)
Comparative analysis of water related parameters and photosynthetic characteristics in the endangered plant <i>Tetraena mongolica</i> Maxim. and the closely related <i>Zygophyllum xanthoxylon</i> (Bunge) Maxim.	SHI Songli, WANG Yingchun, ZHOU Hongbing, et al (1163)
Antioxidant properties of four native grasses in Loess Plateau under drought stress	SHAN Changjuan, HAN Ruilian, LIANG Zongsuo (1174)
The effects of the addition of <i>Ceratobasidium stevensii</i> B6 and its growth on the soil microflora at a continuously cropped water-melon (<i>Citrullus lanatus</i>) site in China	XIAO Yi, WANG Xingxiang, WANG Hongwei, et al (1185)
Suitable habitat for the <i>Achnatherum splendens</i> community in typical steppe region of Inner Mongolia	ZHANG Yifei, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1193)
Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district	GUAN Xiaoyan, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al (1202)
Spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity on a slope of the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau	LIU Chunli, HU Wei, JIA Hongfu, et al (1211)
Spatial and temporal variations of total nitrogen density in agricultural soils of the Songnen Plain Maize Belt	ZHANG Chunhua, WANG Zongming, JU Weimin, et al (1220)
The evaluation system of strength of winteriness in wheat	WANG Peng, ZHANG Chunqing, CHEN Huabang, et al (1230)
A comparison of summer habitats selected by sympatric <i>Apodemus chevrieri</i> and <i>Apodemus draco</i> in Tiangjiahe Nature Reserve, China	LI Yunxi, ZHANG Zejun, SUN Yiran, et al (1241)
Life tables for experimental populations of <i>Frankliniella occidentalis</i> on 6 vegetable host plants	CAO Yu, ZHI Junrui, KONG Yixian (1249)
Effect of diet switch on turnover rates of tissue nitrogen stable isotopes in fish based on the enrichment-dilution approach	ZENG Qingfei, GU Xiaohong, MAO Zhigang, et al (1257)
Recognition of important ecological nodes based on ecological networks analysis: A case study of urban district of Nanjing	XU Wenwen, SUN Xiang, ZHU Xiaodong, et al (1264)
Seasonal characteristics of CO ₂ fluxes above urban green space in the Pearl River Delta, China	SUN Chunjian, WANG Chunlin, SHEN Shuanghe, et al (1273)
Simulation and evaluation of groundwater seepage in contaminated sites: case study of TuoCheng County	WU Yizhong, ZHU Qinyuan, LIU Ning, LU Genfa, DAI Mingzhoet al (1283)
Review and Monograph	
Recent advances in wetland degradation research	HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, LI Ke (1293)
A review concerning nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis	YANG Rong, SU Yongzhong, WANG Xuefeng (1308)
Discussion	
The diversity of the radio-resistant bacteria <i>Deinococcus radiodurans</i>	TU Zhenli, FANG Lijing, WANG Jiagang (1318)
Effect of pruning measure on physiology character and soil waters of <i>Caragana korshinskii</i>	YANG Yongsheng, BU Chongfeng, GAO Guoxiong (1327)
Scientific Note	
Characteristics of rainfall interception for four typical shrubs in Qilian Mountain	LIU Zhangwen, CHEN Rensheng, SONG Yaoxuan, et al (1337)
Dormancy break approaches and property of dormant seeds of wild <i>Cryptotaenia japonica</i>	YU Mei, ZHOU Shoubiao, WU Xiaoyan, et al (1347)

《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 4 期 (2012 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 4 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