

# 基于 Penman-Monteith 的浙江省杂交晚稻甬优 17 需水量空间变异性

冯 晖<sup>1</sup>, 陈 达<sup>1</sup>, 陈海生<sup>1,2</sup>, 肖淑媛<sup>1\*</sup>, 陈宗顺<sup>1</sup>

(1. 益阳职业技术学院, 湖南 益阳 413000; 2. 浙江同济科技职业学院, 浙江 杭州 311231)

**摘 要:**采用地统计与 GIS 相结合的方法, 研究了浙江省杂交晚稻甬优 17 各生育期需水量的空间变异性, 结果表明: 浙江省杂交晚稻甬优 17 各生长阶段需水量为 22.40 ~ 82.79 mm, 以成熟收获期水稻需水量的变异系数最大, 以拔节孕穗期的变异系数最小。杂交晚稻甬优 17 各生育期需水量的  $C_v/(C_0+C)$  值在 0.20 ~ 0.50。其中分蘖期需水量的  $C_v/(C_0+C)$  值最少, 为 0.2, 播种育苗期需水量的  $C_v/(C_0+C)$  值最大, 为 0.5。各生育期需水量的变程在 84 600 ~ 2 229 900 m 之间, 以拔节孕穗期需水量的变程最小, 以播种育苗期需水量的变程最大。浙江省杂交晚稻甬优 17 大田生长期水稻需水量大于 323.50 mm 的高值区位于浙江省的西南部、中部和北部的一部分地区, 占研究区总面积的 31.29%, 大部分地区的水稻需水量为 270.83 ~ 323.49 mm, 占研究区总面积的 66.43%。

**关键词:**需水量; 地统计; 杂交晚稻甬优 17; 浙江

中图分类号: S511

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2020)03-0081-05

## Spatial Variability of Water Requirement of Hybrid Late Rice Yongyou 17 in Zhejiang Province Based on Penman-Monteith

FENG Hui<sup>1</sup>, CHEN Da<sup>1</sup>, CHEN Haisheng<sup>1,2</sup>, XIAO Shuyuan<sup>1\*</sup>, CHEN Zongshun<sup>1</sup>

(1. Yiyang Vocational and Technical College, Yiyang 413000; 2. Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China)

**Abstract:** The spatial variability of water requirement of late hybrid rice Yongyou 17 in Zhejiang Province was studied by geostatistics and GIS in this study. The results showed that the water requirement of Yongyou 17 was 22.40~82.79 mm in different growth stages, and the variation coefficient of water requirement at mature harvest stage was the largest, and that at jointing and booting stage was the smallest. The  $C_v/(C_0+C)$  value of water requirement in different growth stages of hybrid late rice Yongyou 17 ranged from 0.20 to 0.50. The value of  $C_v/(C_0+C)$  of water requirement at tillering stage was the least, which was 0.2, and the value of  $C_v/(C_0+C)$  in sowing and seedling stage was the highest, which was 0.5. The range of water requirement in different growth stages ranged from 84 600 m to 2 229 900 m. the water requirement at jointing and booting stage was the smallest, and that of sowing and seedling stage was the largest. The high value area of rice water requirement greater than 323.50 mm is located in the southwest, central and northern parts of Zhejiang Province, accounting for 31.29% of the total area of the study area. The water requirement of rice in most areas is 270.83~323.49 mm, accounting for 66.43% of the total area of the study area.

**Key words:** Water Requirement; Geostatistics; Hybrid late rice Yongyou 17; Zhejiang

水稻的需水量为水稻植物蒸腾与棵间蒸发之和, 亦称腾发量。它是水稻水循环系统的重要组成部分, 其大小和当地气象条件、土壤性质和农业技术措施有关。水稻需水量是确定水稻灌溉制

度的区域灌溉用水量的基础, 也是制定流域水利规划以及灌溉排水工程规划、设计、管理和实施的基本依据<sup>[1-5]</sup>。在一个区域内, 由于气象条件的变化、土壤肥力的不同, 以及水稻生育进程的推进, 水稻需水量在空间上时间上都存在一定的变异性。如何在有限的站点资料的基础上, 尽可能采取科学的高精度的估算方法, 来确定非测点的水稻需水量值, 就显得十分重要。

水稻需水量一般是通过参考作物蒸散量

收稿日期: 2019-01-23

基金项目: 浙江省科技厅公益性项目 (LGN18C030002)

作者简介: 冯 晖 (1973-), 男, 副教授, 主要从事计算机应用技术研究。

通讯作者: 肖淑媛, 女, 副教授, E-mail: 807158681@qq.com

( $ET_0$ )乘以作物系数的方法得到。该方法是以水汽扩散理论为基础建立需水量方程<sup>[2]</sup>。考虑气象要素对水汽交换系数的影响建立水汽交换系数的经验公式,导出计算水稻需水量的数学模型。根据对中国大多数省分灌溉试验站实测资料的分析可以证实,用Penman-Monteith公式计算出的参照作物需水量是表示气象因素影响的最适合参数。

近年来,国际上很多国家也用此公式计算作物的需水量,如S. Mandal等<sup>[6]</sup>计算了印度Sagar岛作物的需水量。Rashmi Mehta<sup>[7]</sup>计算印度古吉拉特邦的小麦、玉米的参考蒸腾量和需水量。Akinmutimi A L<sup>[8]</sup>用此公式计算了Nigeria西南部Umu-dike地区的早熟玉米和晚熟玉米的需水量。

浙江省是我国著名的水稻产区<sup>[9]</sup>,水稻种植具有7 000多年的悠久历史。在20世纪90年代以前,浙江省主要水稻产区都是以种植双季稻为主。1974年是浙江省双季稻种植面积最大的一年,达255.53万 $hm^2$ ,其中早稻125.33万 $hm^2$ ,晚稻130.20万 $hm^2$ 。在1992年以后,浙江省主要稻区的水稻种植面积不断下降。目前,由于粮价提高和政府政策的扶持,水稻种植面积又在逐步回升,特别是单季稻的种植面积迅猛扩大。这是由于近年来发展高效省工农业,浙江省水稻大多采用单季稻为主。单季稻种植面积由1990年的20.00万 $hm^2$ 扩大到目前的67.73万 $hm^2$ 。单季晚稻目前已经成为浙江省的粮食主栽作物。

单季水稻在浙江省生长期,气温高,需水量大<sup>[9]</sup>。甬优17是浙江省宁波市农业科学研究院作物研究所、宁波市种子有限公司用甬粳4号A×甬恢12选育的粳型三系杂交水稻单季稻品种。该组合植株高大,生长整齐,茎秆粗壮;分蘖力中等偏弱,穗型大;其米质各项指标均达到食用稻品种品质部颁4等。目前已经成为浙江省主要的单季稻品种。杂交晚稻甬优17播种幼苗期在浙江省稻作区,大都是从5月下旬~6月中旬,分蘖期是从6月下旬~7月中旬,拔节孕穗期是从7月下旬~8月中旬,齐穗灌浆期是从8月下旬~10月上旬。准确确定杂交晚稻甬优17各生育阶段的需水量,对水稻灌溉用水量的确定、水资源平衡研究、及灌溉区用水管理具有现实和深远的意义。

地统计学是以半方差函数为基础,分析分布于空间并显示出不同程度的结构性和随机性的区域化变量并对其实行无偏最优估计的新发展起来的一门理论和方法。在分析变量的空间变异性

时,地统计学理论不但同样依赖样本值的大小,而且也考虑到样本值的空间位置和样子间的距离远近,克服了经典统计学不考虑样本空间位置所形成的缺点。地统计理论曾经广泛应用于土壤学方面的研究上<sup>[10-14]</sup>。近年来,地统计学在环境科学方面的应用也逐渐增多。如Masayuki Kondo等<sup>[15]</sup>应用地统计学方法分析了亚州季风森林区碳通量的空间变异性。Inga Ute Röwer等<sup>[16]</sup>用地统计方法分析了德国西北部土壤中甲烷氧化能力与地貌类型以及土壤属性的空间变异性与相关性。Francisco J<sup>[17]</sup>根据60个采样点的数据,采用地统计学理论中的kiging插值方法,对Spain西南地区的空气污染物的空间分布进行了可视化研究。Agneta Fransson等<sup>[18]</sup>在2005年夏天用地统计学方法分析了北冰洋洋面与空气交界处的二氧化碳含量的空间变异性。刘宏谊等<sup>[19]</sup>根据联合国粮农组织推荐的Penman-Montoith模型,计算甘肃省四十年间(春小麦、玉米、马铃薯)等主要农作物生长期逐日需水量,并分析其时空分布规律。李立等<sup>[20]</sup>依据宝鸡峡灌区11个气象站1981~2008年近三十年的气候数据,基于ArcGIS 9.2平台,成功运用地统计学方法研究了灌区玉米、棉花、冬小麦多年平均需水量在空间上的分布特征。而在GIS支持下应用地统计原理进行某一区域内水稻生育阶段需水量空间变异性方面的研究还不多见。本论文拟采用Penman-Monteith法来计算浙江省各地杂交晚稻甬优17各生育期的需水量,并应用GIS和地统计技术计算杂交晚稻甬优17各生育期需水量在浙江省境内的空间变异特性,以期浙江省水稻的节水灌溉和水资源的可持续利用提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域概况

浙江省是我国水稻的主要产区。浙江省位于我国东南沿海地区,地处亚热带中部,介于北纬 $27^{\circ}12'$ ~ $31^{\circ}31'$ 和东经 $118^{\circ}$ ~ $123^{\circ}$ 之间,属季风性湿润气候,四季分明,光照充足,雨量充沛,空气湿润,雨热季节变化同步,是我国自然条件最优越的地区之一。浙江省年平均气温 $15\sim 18^{\circ}C$ ,极端最高气温 $33\sim 43^{\circ}C$ ,极端最低气温 $-2.2\sim -17.4^{\circ}C$ ;全省年平均降水量是 $980\sim 2\ 000\text{ mm}$ ,年平均日照时间 $1\ 710\sim 2\ 100\text{ h}$ <sup>[9]</sup>。

### 1.2 数据来源

数据来源于《2012浙江省统计年鉴》和《浙江省2012整编气象资料》<sup>[9]</sup>。

### 1.3 水稻需水量的计算

Penman-Monteith 公式以能量平衡和水汽扩散理论为基础,既考虑空气动力学的辐射项的作用,又涉及作物的生理特征,认为在充分供水条件下,下垫面的作物冠层表面也不能视为饱和层,其计算公式中引入表面阻力参数来表征作物生理过程中叶面气孔及表层土壤对水汽传输的阻力作用。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{273 + T} \cdot u_2 \cdot (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 \cdot u_2)} \dots\dots\dots(1)$$

式 1 中,  $ET_0$ —参考作物腾发量 (mm/d);  $R_n$ —作物表层净辐射 ( $MJ/m^2 \cdot d$ );  $G$ —土壤热通量 ( $MJ/m^2 \cdot d$ );  $\Delta$ —温度-饱和水汽压关系曲线上的  $T$  处的切线斜率 ( $kPa/^\circ C$ );  $\gamma$ —干湿表常数 ( $kPa/^\circ C$ );  $T$ —地面以上 2 m 高度处日平均气温 ( $^\circ C$ );  $u_2$ —地面以上 2 m 高度处的风速 (m/s);  $e_a$ —空气饱和水汽压 (kPa);  $e_d$ —空气实际水汽压 (kPa)。

### 1.4 数据处理

地统计学理论中的半方差函数模型是用以描述区域化变量结构性和随机性的一种数学模型。半方差函数的主要参数是块金值、基台值和变程。块金值与基台值之比  $C_0/(C_0+C)$  为基底效应,

表示由随机因素引起的变异和结构性因素引起的变异在总变异中所占的比例,表示系统变量的空间相关性。基底效应值高,说明随机因素造成的空间变异性在总变异中所占的比例较高,基底效应值低,说明由结构性因素造成的空间变异性在总变异中所占的比例较高。基底效应如少于 25%,说明区域化变量具有较强的空间相关性,基底效应如在 25% ~ 75%,说明区域化变量具有中等程度的空间相关性,基底效应大于 75%,说明区域化变量具有较弱的空间相关性<sup>[21-24]</sup>。

利用半方差函数的相关参数对甬优 17 各生育期需水量数据进行空间结构分析。软件平台有 SPSS 11.0,其用来进行描述性统计分析;GS+7.0,其用来进行半方差函数分析<sup>[9]</sup>;ArcGIS 8.3,其用来进行 Kriging 插值<sup>[9]</sup>,绘出数字化地图。

## 2 结果与分析

### 2.1 浙江省杂交晚稻甬优 17 各生长期需水量描述性统计

作物需水量评价的准确性取决于其数据分布特征。如果数据不符合正态分布,其变异函数会产生比例效应。本试验采用 SPSS 11.0 软件的单样本 K-S 检验法,对杂交晚稻甬优 17 生长期各生

表 1 浙江省杂交晚稻甬优 17 各生长期需水量描述性统计特征

| 各生长期需水量 | 分布类型 | 均值    | 中值    | 标准差   | 最小值   | 最大值    | 变异系数 CV(%) |
|---------|------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|
| 播种育苗期   | 正态   | 37.13 | 37.58 | 5.57  | 21.59 | 53.68  | 15.01      |
| 分蘖期     | 正态   | 82.79 | 82.43 | 11.58 | 53.00 | 109.26 | 14.31      |
| 拔节孕穗期   | 正态   | 75.32 | 75.94 | 9.54  | 53.01 | 98.87  | 12.67      |
| 齐穗灌浆期   | 正态   | 60.67 | 58.66 | 10.36 | 38.86 | 92.59  | 17.08      |
| 成熟收获期   | 正态   | 22.40 | 21.80 | 4.08  | 14.30 | 32.43  | 18.21      |

育阶段需水量进行非对数检验。经计算得到的描述性统计特征值见表 1。

由表 1 可知,杂交晚稻甬优 17 各生长阶段需水量都服从正态分布。在水稻播种育苗期,浙江省需水量的平均值为 37.13 mm,介于 21.59 ~ 53.68 mm。在分蘖期,全省水稻需水量平均值为 82.79 mm,介于 53 ~ 109.26 mm,在拔节孕穗期,全省水稻需水量的平均值为 75.32 mm,介于 53.01 ~ 98.87 mm。在齐穗灌浆期,全省水稻需水量平均值为 60.67 mm,介于 38.86 ~ 92.59 mm。在成熟收获期,全省需水量的平均值为 22.40 mm,介于 14.30 ~ 32.43 mm。从变异系数来看,成熟收获期杂交晚稻甬优 17 需水量的变异系数最大,为 18.21%,其次是齐穗灌浆期,为 17.08%,最小的为

拔节孕穗期,只有 12.67%。

### 2.2 半方差函数分析

有效分析水稻需水量在浙江省水稻种植区内空间变异结构的关键,是选择合适的半方差函数模型。采用 GS+7.0 软件,对杂交晚稻甬优 17 各生育期需水量进行半方差函数拟合。选择的原则是决定系数  $R^2$  最大,残差 (RSS) 最小<sup>[12-16]</sup>。

浙江省杂交晚稻甬优 17 各生育期需水量半方差函数见表 2。从表 2 可以看出,除了成熟收获期需水量的理论模型为高斯模型外,其他各生育时期需水量的理论模型都为指数模型。

从表 2 可以看出,杂交晚稻甬优 17 各生育期需水量的  $C_0/(C_0+C)$  值在 0.20 ~ 0.50。其中分蘖期需水量的  $C_0/(C_0+C)$  值为 0.2,为最小值;播种育苗

表2 浙江省杂交晚稻甬优17各生育期需水量半方差函数

| 各生育期需水量(mm)         | 播种育苗期     | 分蘖期     | 拔节孕穗期  | 齐穗灌浆期     | 成熟收获期     |
|---------------------|-----------|---------|--------|-----------|-----------|
| 理论模型                | 指数        | 指数      | 指数     | 指数        | 高斯        |
| 块金值 $C_0$           | 25.40     | 29.80   | 25.00  | 66.90     | 10.66     |
| 基台值 $C_0+C_1$       | 50.81     | 145.20  | 92.50  | 208.50    | 24.85     |
| 块基比 $C_0/(C_0+C_1)$ | 0.50      | 0.20    | 0.27   | 0.33      | 0.43      |
| 变程(m)               | 2 229 900 | 139 800 | 84 600 | 1 472 100 | 1 192 800 |
| 决定系数 $R^2$          | 0.81      | 0.79    | 0.88   | 0.89      | 0.89      |

期需水量的  $C_0/(C_0+C)$  值为 0.5, 为最大值。如果某变量的块金效应  $C_0/(C_0+C)$  值少于 25% 时, 表示此变量的空间相关性强, 介于 25% ~ 75% 时, 表示此变量的空间相关性中等<sup>[8-10]</sup>。因此, 可以认为杂交晚稻甬优 17 分蘖期需水量在浙江省境内具有强的空间相关性, 其空间相关性主要是由经纬度等结构性因素造成的。其他生育期需水量在浙江省境内都具有中等程度的空间相关性。其空间变异性是由经纬度等结构性因素和地形、海拔高度以及耕作等随机性因素共同作用而成的。

杂交晚稻甬优 17 各生育期需水量的空间自相关范围具有明显差异。各生育期需水量的变程在 84 600 ~ 2 229 900 m 之间, 以拔节孕穗期需水量的变程最小, 只有 84 600 m, 以播种育苗期需水量的变程最大, 为 2 229 900 m。其他生育时期如分蘖期、齐穗灌浆期、成熟收获期需水量的变程则分别为 139 800 m、1 472 100 m 和 1 192 800 m。

### 2.3 浙江省杂交晚稻甬优 17 稻生长期需水量分布特征

当杂交晚稻甬优 17 处于播种育苗期时, 水稻需水量 37.66 ~ 53.63 mm 的中高值区位于浙江省北部, 西南部和中部, 占研究区总面积的 50.98%。需水量少于 37.65 mm 低值区处在浙江省的东部和西北部, 占研究区总面积的 49.02%。

当杂交晚稻甬优 17 处于分蘖期时, 水稻需水量为 95.21 ~ 109.22 mm 的高值区位于金衢盆地和绍兴市的上虞、余姚一带, 占研究总面积的 8.48%。而需水量为 81.20 ~ 95.20 mm 中值区位于浙江省的北部、中部和西南部, 占研究区总面积的 49.64%。而需水量少于 81.20 mm 的低值区则位于浙江省的东南部和西北部, 占研究区总面积的 42.88%。

在杂交晚稻甬优 17 拔节孕穗期, 需水量少于 75.96 mm 的低值区处于浙江省的中部、东南部和西北部, 占研究区总面积的 52.46%, 需水量在 75.97 ~ 98.80 mm 的中高值区处于浙江省金衢盆

地的大部和西南部, 占研究区总面积的 47.54%。

在杂交晚稻甬优 17 齐穗灌浆期, 需水量大于 65.72 mm 的高值区位于浙江省的西南部, 占研究区总面积的 18.32%, 大部分地区是需水量在 52.31 ~ 65.71 mm 之间中值区, 占研究区总面积的 75.47%。

在杂交晚稻甬优 17 成熟收获期, 需水量大于 23.38 mm 的高值区处于浙江省中部和西南部, 占研究区总面积的 22.55%, 大部分地区的杂交晚稻甬优 17 需水量是在 18.85 ~ 23.37 mm 之间的中值区, 占研究区总面积的 71.62%。

从浙江省杂交晚稻甬优 17 总的生长期来看, 水稻需水量大于 323.50 mm 的高值区位于浙江省的西南部、中部和北部的一部分地区, 占研究区总面积的 31.29%, 浙江省的西北部、东部和东南部的广大地区, 其杂交晚稻甬优 17 需水量为 270.83 ~ 323.49 mm, 占研究区总面积的 66.43%。

## 3 结论与讨论

(1) 作物需水量确定的指标主要是气象指标、植物指标、土壤指标。气象指标主要是气温、大气湿度、太阳有效辐射、日照时数、风速等。Penman-Monteith 公式综合考虑了各种气象因素对需水量的影响, 具有可靠的物理基础。Penman-Monteith 公式使用时不需要进行区域率定, 是世界通用的利用气象参数计算参考作物需水量的标准方法。

(2) 经典统计学的分析结果表明, 浙江省杂交晚稻甬优 17 各生长阶段需水量服从正态分布。播种育苗期浙江省需水量的均值为 37.13 mm, 分蘖期为 82.79 mm, 拔节孕穗期为 75.32 mm, 齐穗灌浆期均值为 60.67 mm, 成熟收获期为 22.40 mm。从变异系数来看, 成熟收获期水稻需水量的变异系数最大, 为 18.21%, 其次是齐穗灌浆期, 为 17.08%, 最小的为拔节孕穗期, 只有 12.67%。

(3) 本研究中杂交晚稻甬优 17 各生育期需水

量的  $C_0/(C_0+C)$  值在 0.20 ~ 0.50。其中分蘖期需水量的  $C_0/(C_0+C)$  值为 0.2, 为最小值; 播种育苗期需水量的  $C_0/(C_0+C)$  值为 0.5, 为最大值。说明杂交晚稻甬优 17 分蘖期需水量在浙江省境内具有强的空间变异性, 其他生育期需水量在浙江省境内都具有中等程度的空间变异性。杂交晚稻甬优 17 各生育期需水量的空间自相关范围具有明显差异。各生育期需水量的变程在 84 600 ~ 2 229 900 m 之间, 以拔节需水量的变程最少, 以播种育苗期需水量的变程最大。

(4) 从浙江省杂交晚稻甬优 17 总的生长期来看, 水稻需水量大于 323.50 mm 的高值区位于浙江省的西南部、中部和北部的一部分地区, 占研究区总面积的 31.29%, 大部分地区的水稻需水量为 270.83 ~ 323.49 mm, 占研究区总面积的 66.43%。

(5) 气候的变化、农作物生长进程的不同, 都会引起农作物需水量的变化<sup>[25-26]</sup>。某一区域内作物需水量的正确计算和快速预测, 可为该区域农作物合理布局提供依据。对合理配置水资源、实现五水共治有着重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] 韩伟锋, 武继承, 何方, 等. 作物需水量研究综述[J]. 华北水利水电学院学报, 2008, 29(5): 30-33.
- [2] 付晓刚, 周亚红, 毕攀, 等. 基于彭曼公式的作物灌溉需水量确定方法研究[J]. 人民黄河, 2009, 31(5): 85-87.
- [3] 杨玫, 孙西欢. 参考作物腾发量计算方法在玛纳斯河流域的应用比较[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(1): 125-129.
- [4] 司建华, 龚家栋, 张勃. 干旱地区生态需水量的初步估算—以张掖地区为例[J]. 干旱地区资源与环境, 2004, 18(1): 49-53.
- [5] 符娜, 李闯, 刘艳伟, 等. 基于灌溉需求指数的滇中地区烤烟需水量时空变化分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 155-161.
- [6] S Mandal, B U Choudhury, L N Satpati. Monsoon variability, crop water requirement, and crop planning or kharif rice in Sagar Island, India[J]. Int J Biometeorol, 2015(59): 1891-1903.
- [7] Rashmi Mehta. Reference evapotranspiration(ET<sub>o</sub>) and crop water requirement(ET<sub>c</sub>) of wheat and maize in Gujarat[J]. Journal of Agrometeorology, 2015, 7(1): 107-113.
- [8] Akinmutimi, A. L. Estimation of water requirements of early and late season maize in Umudike southeastern Nigeria, using Penman's equation[J]. Journal of Soil Science and Environmental Management, 2015, 6(2): 24-28.
- [9] 陈海生, 杨玉泉. 浙江省杂交晚稻甬优 9339 产量及生长期降水量空间变异性[J]. 西南农业学报, 2016, 29(10): 2263-2267.
- [10] 江厚龙, 王新中, 刘国顺. 烟田土壤质地的空间变异性研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 724-729.
- [11] 张春华, 王佩, 王可. 小尺度下烟田土壤养分空间变异性研究[J]. 中国烟草科学, 2014, 35(5): 74-78.
- [12] 贺凡, 常栋, 刘国顺. 不同类型植烟土壤有机质含量的空间变异特征[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(4): 321-323.
- [13] 腊贵晓, 顾怀胜, 刘国顺, 等. 喀斯特地区烟田土壤养分空间变异特征[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 48-53.
- [14] 马红菊, 付梦洋, 代天飞, 等. 德阳旌阳区土壤有机质的空间变异性及其影响因素分析[J]. 西南农业学报, 2016, 29(6): 1375-1380.
- [15] Masayuki Kondo, Taku M Saitoh, Hisashi Sato, et al. Comprehensive synthesis of spatial variability in carbon flux across Monsoon Asian forests[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 232: 623-634.
- [16] Inga Ute Röwer, Christoph Geck, Julia Gebert, et al. Spatial variability of soil gas concentration and methane oxidation capacity in landfill covers[J]. Waste Management 2011(3): 926-934.
- [17] Francisco J. Mapping and hazard assessment of atmospheric pollution in a medium sized urban area using the Rasch model and geostatistics techniques[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(8): 1408-1418.
- [18] Agneta Fransson, Melissa Chierici, Yukihiro Nojiri. New insights into the spatial variability of the surface water carbon dioxide in varying sea ice conditions in the Arctic Ocean[J]. Continental Shelf Research 2009, 29(10): 1317-1328.
- [19] 刘宏谊, 马鹏里, 杨兴国, 等. 甘肃省主要农作物需水量时空变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 39-44.
- [20] 李立, 魏晓妹, 韩业珍. 基于地统计学的作物需水量空间变异性分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 239-241.
- [21] Amanda Brown, Judith H Myers. Temporal and spatial variability of rosy apple aphid *Dysaphis plantaginea* populations: is there a role of the alternate host plant *Plantago major*[J]. Agricultural and Forest Entomology, 2010, 12(4): 333-341.
- [22] Justin D Liefer, Hugh L MacIntyre, Lucie Novoveska, et al. Temporal and spatial variability in *Pseudo-nitzschia* spp. in Alabama coastal waters: A "hot spot" linked to submarine groundwater discharge[J]. Agricultural and Forest Entomology, 2009, 8(5): 706-714.
- [23] Senarath A, Palmer A S, Tillman R W. Soil spatial variability of drainage properties in relation to phosphate retention and mineralogy on a river terrace of northern Manawatu, New Zealand[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(1): 69-76.
- [24] Jiang Houlong, Liu Guoshun, Wang Xinzhong, et al. Spatial variability of soil properties in a long-term tobacco plantation in central China[J]. Soil Science, 2010, 175(3): 137-144.
- [25] 王萍, 李秀芬, 姜丽霞, 等. 气候变化背景下黑龙江省主栽作物稳产类型区划[J]. 东北农业科学, 2019, 44(4): 85-88.
- [26] 邱美娟, 王冬妮, 王美玉, 等. 近几十年吉林省水稻品质气候资源变化状况[J]. 东北农业科学, 2018, 43(2): 54-59.

(责任编辑:王 昱)