

长三角区域表层土壤水分时间稳定性及其影响因子^①

殷贝妮^{1,2,3}, 朱青^{2,3*}, 廖凯华²

(1 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044; 2 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 211135;
3 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

摘要: 利用长三角地区 2015 年 4 月至 2018 年 12 月逐日表层土壤水分遥感产品(1 km 空间分辨率), 计算各像元土壤水分的平均相对差(MRD)及其标准差(SDRD), 刻画了研究区土壤水分时间稳定性; 并在此基础上, 采用随机森林模型探究了地形、气候和人类活动等环境因子对土壤水分时间稳定性时空分异的影响。结果表明: ①年际变化上, 研究区土壤水分 MRD 值空间变化由南向北逐渐递减, SDRD 值空间分布则相反; ②年内季节变化上, 研究区土壤水分 MRD 值空间变化显著, 春冬季相较于夏秋季 MRD 值波动更加剧烈, 而 SDRD 值则空间变化不明显, 中高值区分布各异; ③研究区土壤水分 MRD 值空间分布和高程、坡度以及降水分布大致相同, 土壤水分 MRD 值随这 3 个环境因子的升高而呈现增高的趋势, SDRD 值分布则与其相反, 其余环境因子在空间分布上对土壤水分时间稳定性有影响; ④气候因子和地形因子对研究区土壤水分时间稳定性贡献率最高, 其余环境因子在不同的季节和土壤覆被类型上影响程度不同。

关键词: 土壤水文; 时间稳定性; 环境因子; 时空分异

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

Temporal Stability of Surface Soil Moisture and Its Influencing Factors in Yangtze River Delta Region

YIN Beini^{1,2,3}, ZHU Qing^{2,3*}, LIAO Kaihua²

(1 School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2 Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3 College of Nanjing, University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

Abstract: In this study, the daily remote sensing data of surface soil moisture with 1 km spatial resolution in the Yangtze River Delta region from April 2015 to December 2018 were analyzed, the temporal stability of soil moisture was assessed by the mean relative difference (MRD) and its standard deviation (SDRD) for each pixel of the data, and random forest model was employed to explore the impact of environmental factors like topography, climate, and human activities on the temporal differentiation and stability soil moisture. The results showed that: 1) In terms of interannual variation, MRD of soil moisture in study area exhibited a gradual decrease in spatial variation from north to south, while SDRD showed the opposite trend. 2) In terms of seasonal change within a year, the spatial variation of soil moisture MRD was more significant. The fluctuation was more pronounced in spring and winter compared to summer and fall. And the spatial variation of SDRD was less distinct, and the distribution of middle- and high-value zones differed. 3) The spatial distribution of soil moisture MRD was closely correlated with elevation, slope and precipitation. As MRD increased, these factors also showed a tendency to increase. However, the distribution of SDRD exhibited an opposite trend, while other environmental factors affected its spatial distribution. 4) Climate and topography factors exhibited the highest contribution to time stability of soil moisture in study area, and other environmental factors had varying degrees of influence depending on the season and soil cover type.

Key words: Soil hydrology; Temporal stability; Environmental factors; Temporal and spatial differentiation

①基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(42125103)和中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA23020200)资助。

* 通讯作者(qzhu@niglas.ac.cn)

作者简介: 殷贝妮(1999—), 女, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要从事土壤水文遥感研究。E-mail: yinbeini22@mails.ucas.ac.cn

土壤水分是指地表以下至潜水面以上土壤孔隙之间的水分^[1], 是全球水循环和地表能量平衡的重要参数^[2]。受气候、土壤性质、人类活动、地形以及下垫面条件等因素的影响, 土壤水分在时间和空间尺度上变化剧烈^[2]。土壤水分的时空分异, 决定着径流、下渗和蒸散等水文过程在不同时空尺度上的变化规律, 并影响着植被生产力、污染物迁移转化和地质灾害产生发展等重要的陆表过程^[2]。因此, 研究土壤水分时空变化特征以及控制因素具有重要的现实和科学意义。

土壤水分是综合的状态变量, 并在空间上呈现出随机性。传统点尺度的土壤水分监测虽然具有较高精度^[3], 但凭借有限的点位难以代表一定空间尺度的土壤水分。因此前人提出可以借助数理规律探究土壤水分的空间分布模式。Vachaud 等^[4]首先提出土壤水分时间稳定性概念, 即土壤水分的空间格局在不同时间具有稳定性和自相关性^[5]。基于该理论, 前人尝试通过少数代表性土壤水分实测样点, 反映整个区域的土壤平均水分状况。例如, 朱青等^[6]基于土壤水分时间稳定性分析, 选取典型监测样点, 预测了坡面不同点位、不同时期土壤含水量; Wang 等^[7]通过布设土壤水分代表样点, 建立土壤水分监测网络, 利用时间稳定性分析预估了流域尺度上土壤水分的均值。但土壤水分的时空变化规律受到不同环境因子的控制, 并随着空间尺度和区域特性而变化。在地形复杂区域, 土壤水分时间稳定性对海拔和坡度响应强烈^[8]; 而在平坦区域, 地形则对土壤水分时间稳定性的影响较小^[9]。其他研究也发现, 土壤水分时间稳定性受土壤质地、地形和土地利用类型等因素综合作用, 且土壤水分时间稳定性的主控因子在不同尺度上表现不同^[10]。然而, 以往的研究多针对小尺度地区的土壤水分时间稳定性进行分析, 而针对大尺度时, 由于精确、高时空分辨率土壤水分数据的缺乏, 土壤水分时间稳定性及其控制机制仍然缺乏系统的研究。

长三角区域横跨湿润和半湿润地区, 降水跨度大, 丘陵山地与平原河网交错分布, 地形分异较为复杂。此外, 该区域土地利用类型多样, 城镇面积占比高, 水资源分配不平衡, 土壤水分时空分异明显^[10]。研究长三角地区土壤水分的时间稳定性有助于探究复杂地表大尺度土壤水分时空变化规律。因此, 本研究以长三角为研究区域, 基于 1 km 空间分辨率的逐日表层土壤水分遥感产品, 计算土壤水分时间稳定性, 分析土壤水分稳定性的时间变化规律, 探究地形、气候和人类活动等因素对土壤水分时间稳定性时空

分异的影响, 以为农业生产提升、洪旱灾害评估和应对, 以及污染物防控和治理等提供重要依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

长三角地区($115^{\circ}\text{E} \sim 123^{\circ}\text{E}$, $29^{\circ}\text{N} \sim 32^{\circ}\text{N}$)包括江苏省、安徽省、浙江省和上海市(图 1), 面积约为 35.8 万 km^2 。该区域地形以平原和小型丘陵为主, 地势呈现西南高、东北低的特点, 海拔为 0 ~ 1 635 m, 土地利用类型以耕地和林地为主, 耕地占比 51.9%, 林地占比 29.5%, 此外, 水体占比 6.6%, 不透水面占比 12.1%。该区域淮河以南属亚热带季风气候, 北部为温带半湿润季风气候, 雨热同期, 洪涝灾害频繁。年均气温为 $16.0 \sim 18.4^{\circ}\text{C}$, 多年平均降水量介于 $800 \sim 2 400 \text{ mm}$, 水资源丰富, 是我国河网密度最高的区域。

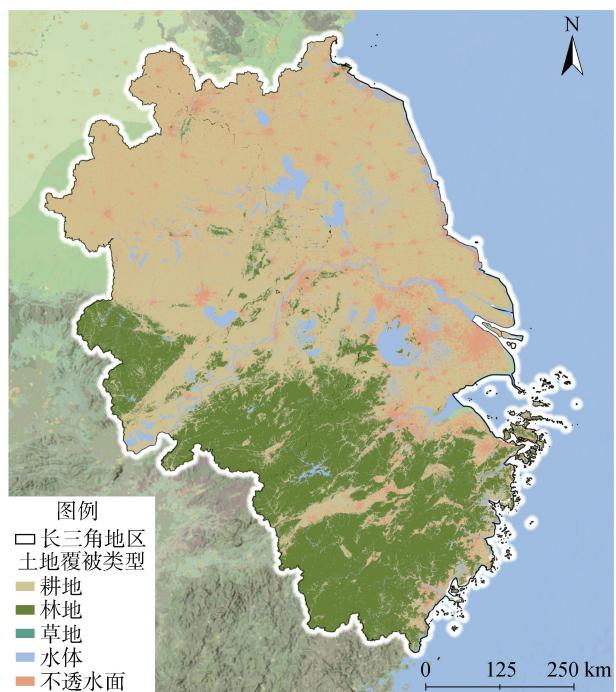


图 1 长三角土地覆被类型空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of land cover types in Yangtze River Delta

1.2 数据来源和处理

研究区土壤水分遥感数据来源于 Li 等^[11]在美国国家航空航天局发布的融合增强型 SMAP 全球土壤水分数据集和欧空局 ESA CCI 遥感土壤水分数据集的基础上, 采用分发机制算法(DISPATCH)和随机森林算法降尺度生成的空间分辨率为 1 km 的逐日土壤水分数据集。该数据集的时间覆盖范围为 2015 年 4 月至 2018 年 12 月。土地利用类型数据来源于武汉大

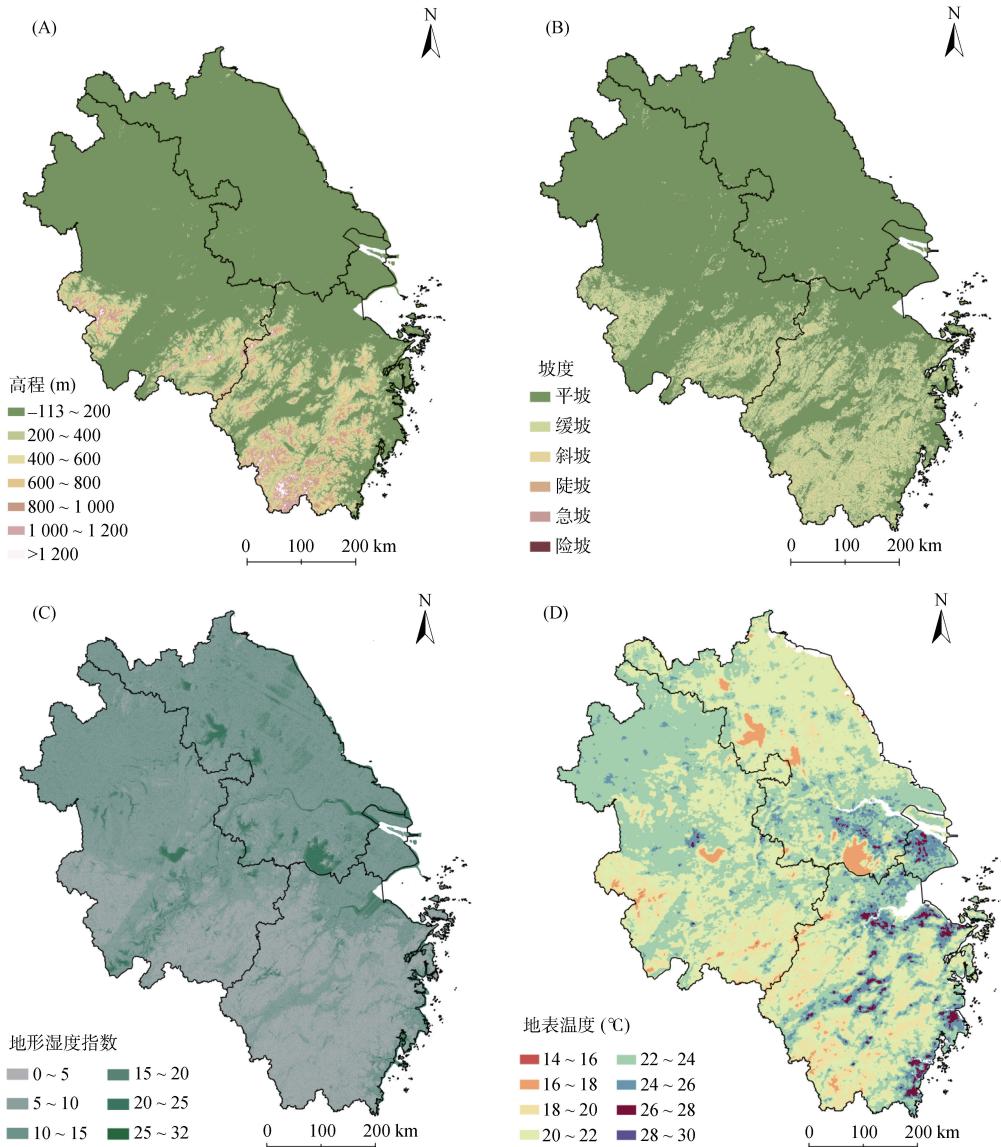
学发布的中国土地覆盖数据集(<http://irsip.whu.edu.cn/resources/CLCD.php>)。环境因子数据分为气象、土壤质地、地形和人类活动。气象因子采用国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>)的年度和月度降水量和地表温度数据集,空间分辨率为1 km^[12];蒸散发量数据来自MOD16A2版本的蒸发蒸腾/潜热通量产品。土壤质地因子包括砂粒含量、黏粒含量,数据来源于国家科技基础条件平台土壤分中心的土壤质地数据集^[13](<http://soil.geodata.cn/data/>),空间分辨率为1 km。人类活动采用归一化植被指数(NDVI)和夜间灯光数据表征,本研究基于Google Earth Engine(GEE)遥感云计算平台,获取空间分辨率为30 m的NDVI数据和空间分辨率为1 km的夜间灯光数据。本研究的地形因子包括坡度、高程、地形湿度指数,

高程和坡度数据在GEE平台上由NASA SRTM Digital Elevation 30 m数据集生成,地形湿度指数利用高程和坡度在ArcGIS10.8中计算。将上述环境因子数据在ArcGIS10.8中重采样至1 km,删除无效值和空值后共35万余组数据。研究区各环境因子的空间分布如图2所示。

1.3 研究方法

1.3.1 时间稳定性分析 Jacobs等^[14]建议将平均相对差(MRD)及其标准差(SDRD)作为土壤水分时间稳定性的评价指标,表征土壤水分稳定性的时空变异程度。每个像元*i*随时间变化的MRD和SDRD计算公式如下:

$$MRD_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{S_{i,j} - \bar{S}_j}{\bar{S}_j} \quad (1)$$



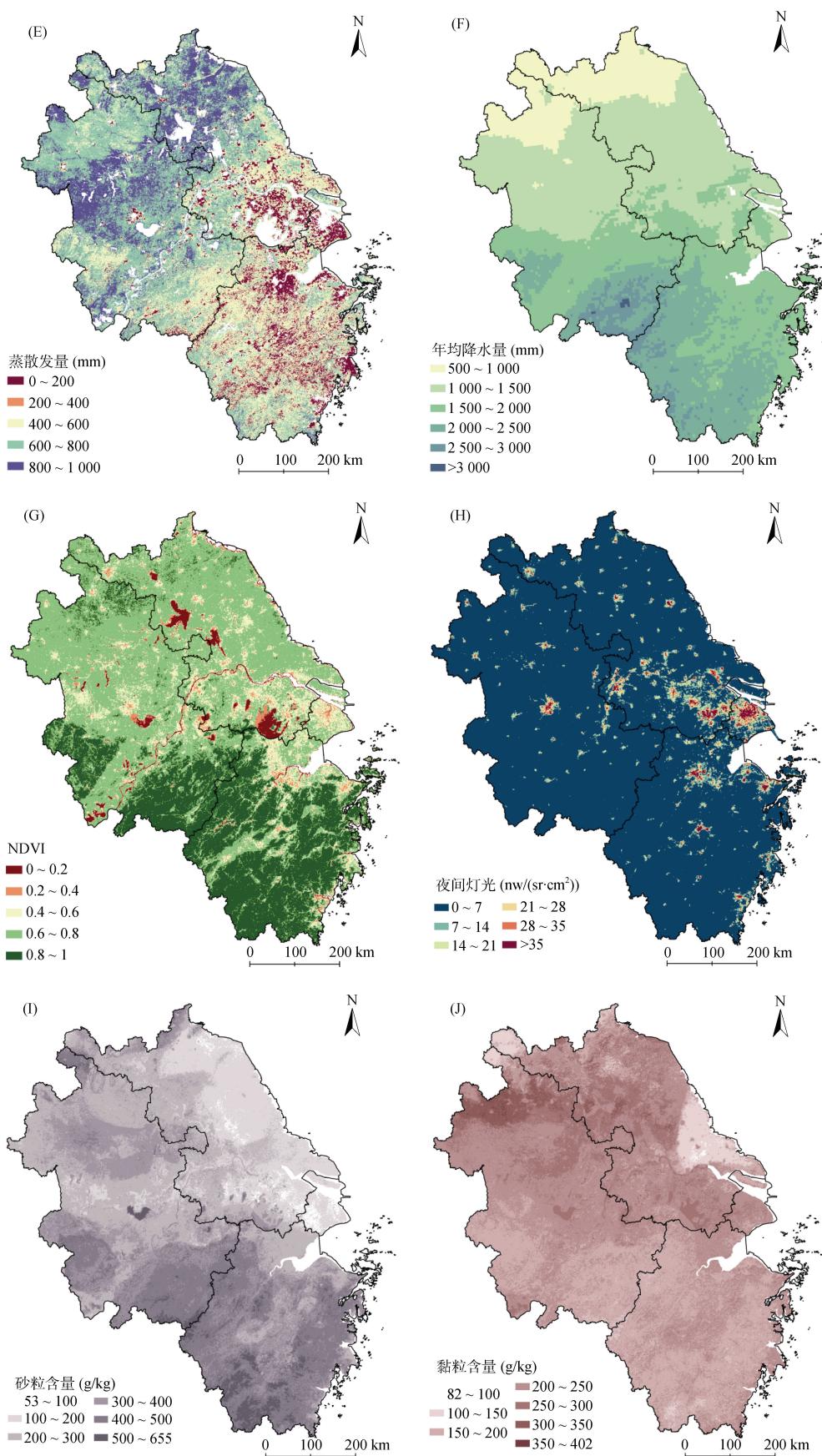


图2 长三角各个环境因子的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of various environmental factors in Yangtze River Delta

$$SDRD_i = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m \left(\frac{S_{i,j} - \bar{S}_j}{\bar{S}_j} - MRD_i \right)^2} \quad (2)$$

式中: \bar{S}_j 为研究区在 j 时刻所有像元的平均土壤水分; m 为总研究天数; $S_{i,j}$ 表示 i 像元点在 j 时刻的土壤水分值。

MRD 表征具体像元相对于长三角地区土壤水分平均值的情况, 即表征土壤的干湿程度, 当 MRD 等于 0 时, 该像元的土壤水分状况与研究区平均土壤水分状况一致; MRD 为正值时, 表明该像元的土壤水分值相对区域平均值偏高, MRD 为负值则偏低。SDRD 则反映了某个像元土壤水分 MRD 值在时间上的波动状况, 即表征土壤水分的时间稳定性, SDRD 值越高表示该像元 MRD 值在时间上的波动越剧烈。本研究基于 2015 年 4 月至 2018 年 12 月长三角地区土壤水分逐日遥感数据, 进行 MRD 和 SDRD 逐像元计算, 并对春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12 月—次年 2 月)的计算数据进行统计分析。

1.3.2 环境因子贡献 随机森林(RF)是以决策树和 Bagging 为基础的集成学习算法, 构建并组合决策树可提高回归模型的泛化能力和模型精度^[15]。在使用 RF 进行回归过程中, 利用 Bagging 法从样本集中有放回地抽取训练样本进行预测, 部分未被使用的训练样本被称作袋外数据(OOB), 用以判断 RF 模型效果。使用 RF 进行变量重要性评估, 基本思路是计算 OOB 测试模型中的误差, 基于平均下降精度给出该变量的重要性评分。

RF 计算特征值 X 公式如下:

$$X = \frac{\sum (\text{err}_{\text{OOB}2} - \text{err}_{\text{OOB}1})}{n} \quad (3)$$

式中: $\text{err}_{\text{OOB}1}$ 为每一棵决策树计算的袋外数据误差; $\text{err}_{\text{OOB}2}$ 为随机对所有 OOB 样本加入噪声干扰之后计算出的袋外数据误差。加入随机噪声后, OOB 准确率大幅度下降即 $\text{err}_{\text{OOB}2}$ 上升, 说明特征 X 显著影响了样本的预测结果, 即样本 X 重要性评分较高。

本研究利用 RF 分别计算长三角整体及不同土地覆被类型下环境因子对土壤水分 MRD 和 SDRD 空间分异的影响程度, 并进一步探究不同季节下土壤质地、地形、气象以及人类活动因子对土壤水分时间稳定性的贡献。模型精度评定采用 k 折交叉验证, k 取 10。精度评定指标采用决定系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE)。RF 模型精度取决于两个决定性参数, 即决策树数量 Ntree 和叶节点数 Mtry。本研究决策树数量

设置为 100, 数量大于 100 时, 精度开始趋于稳定; 叶节点数为 6 时构建模型精度最高, 对于 MRD 的 RF 模型, $R^2 \geq 0.90$ 且 $1.02e^{-6} < \text{RMSE} < 9.86e^{-6}$, 对于 SDRD 的 RF 模型, $R^2 \geq 0.90$ 且 $9.71e^{-6} < \text{RMSE} < 1.12e^{-5}$ 。

2 结果与讨论

2.1 年际土壤水分时间稳定性的空间分布特征

研究区内各个像元 2015 年 4 月至 2018 年 12 月土壤水分 MRD 值如图 3A 所示。MRD 值由南向北逐渐递减, 在空间上有较大差异, 低值区分布在北部黄淮平原, 中值区位于中部的长江中下游平原, 而高值区处于南部的低山丘陵区。这主要是由于南部属于湿润地区, 年降水量超过 1 500 mm, 地形以低山丘陵为主且植被覆盖率高, 土壤保水能力强, 而北部的黄淮平原属于半湿润地区, 耕地占比高, 多年平均降水量为 800~1 000 mm, 水资源总量少^[16], 导致土壤水分相对于整个长三角呈较低的状态。长三角土壤水分 MRD 值在空间上总体与降水和高程分布较为一致, 但在局部区域有较大差异, 这是因为长三角地区地表状况复杂^[11], 土壤水分状况还受植被和蒸散发等因素的影响。

研究区内各个像元土壤水分 SDRD 值空间分布如图 3B 所示。SDRD 值空间分布上和 MRD 值相反, 低值区主要分布在南部低山丘陵区, 中低值区主要分布在中部的长江中下游平原, 而高值区主要分布在北部的黄淮平原。与 MRD 值空间变化的驱动因素相似, SDRD 值空间分布遵循地形和降水的空间变化趋势。此外, SDRD 值最高的区域位于皖北平原, 该区域位于南北气候过渡带, 降水时间分配不均且蒸发量大^[16], 旱涝事件频发^[17], 各因素综合导致了土壤水分在时间上波动较为剧烈。同时, 在南部的浙江金华、衢州一带, 因地势相对周边区域较低、坡度较缓, 成为土壤水分汇流区, 因此这一区域 SDRD 值也偏高。

2.2 年内季节土壤水分时间稳定性空间分布特征

长三角地区土壤水分 MRD 值的空间分布存在季节性变化规律(图 4A), 表明不同季节土壤水分空间分布的规律不同。其中, 春季和冬季 MRD 值的空间变化相较于夏季和秋季更为剧烈, 这与王国杰等^[18]和娄丹^[19]在长江中下游地区得出的结论一致, 即长江中下游夏秋季土壤水分空间差异性低, 春冬季则相反。春季土壤水分的 MRD 值存在明显的南北差异, 具体表现为: 东南部 MRD 值高而西北部 MRD 值较低, 北部尤其是黄淮平原 MRD 值最低。夏季 MRD 高值区位于温州、丽水等南部高海拔地区, 与该地区

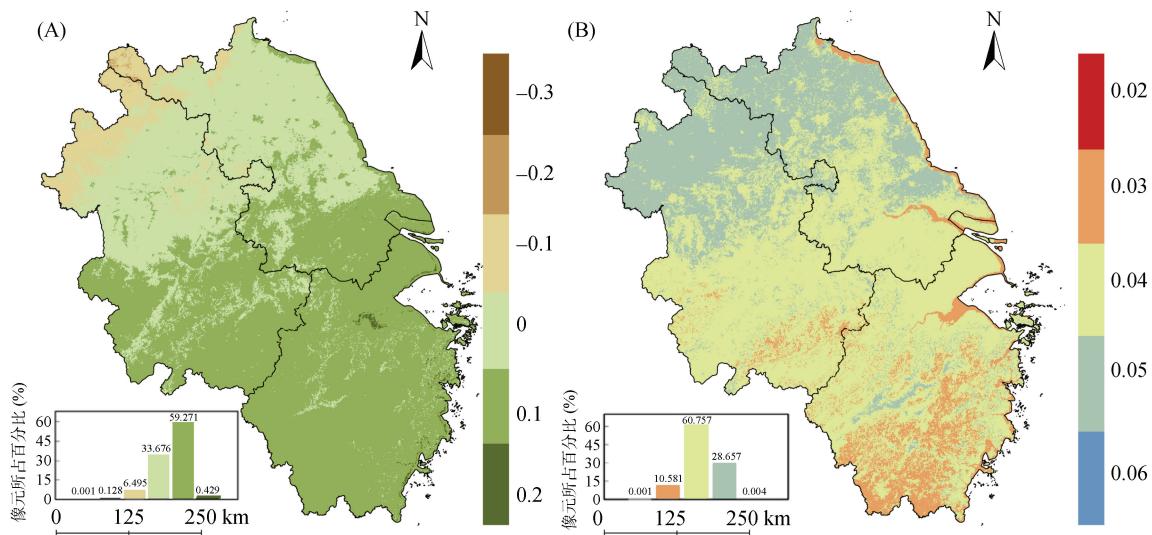


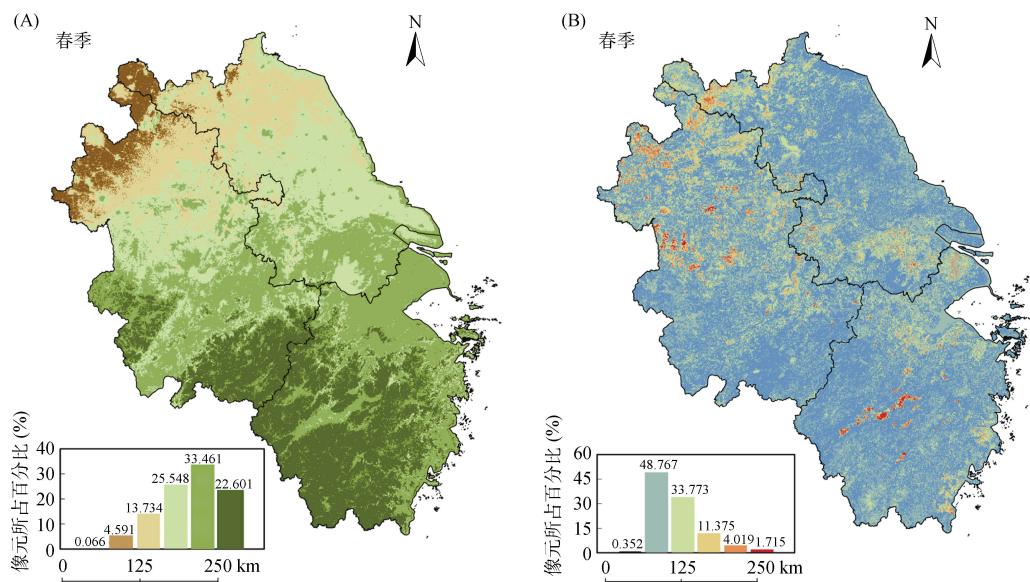
图3 2015年4月至2018年12月长三角土壤水分MRD (A)及SDRD (B)的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of MRD (A) and SDRD (B) of soil moisture in Yangtze River Delta from April 2015 to December 2018

夏季降水量大有关。秋季极端降水情况逐渐减少,蒸散发量和地表温度南北空间分布相对于春冬两季差距较小^[20],所以MRD值空间分布差异小,但高值区依然位于长三角的中部和南部地区。冬季MRD高值区位于江苏中部、南部和安徽中部地区,中值区分布在南部丘陵和皖北地区,低值区分布在黄淮平原最北部区域。冬季MRD中值区和低值区的冬季降水较少,可能在一定程度上降低了土壤水分。夏秋季皖北平原和徐州北部MRD值相较冬春季要高,这可能是由于

该区域作物种植和人工灌溉的影响^[21]。

长三角地区土壤水分的SDRD值空间分布也存在季节性变化规律(图4B),表明在不同季节,各像元的土壤水分波动剧烈程度不同。SDRD值在春季较低且没有显著的空间变化规律,高值区散布于北部黄淮平原和中部的太湖流域,但相对于其他季节SDRD低值区占比较高。夏季SDRD值在长三角南部地区也无明显空间变化规律,但高值区分布在北部与山东河南两省交界区域,该区域夏季炎热潮湿,蒸散发指



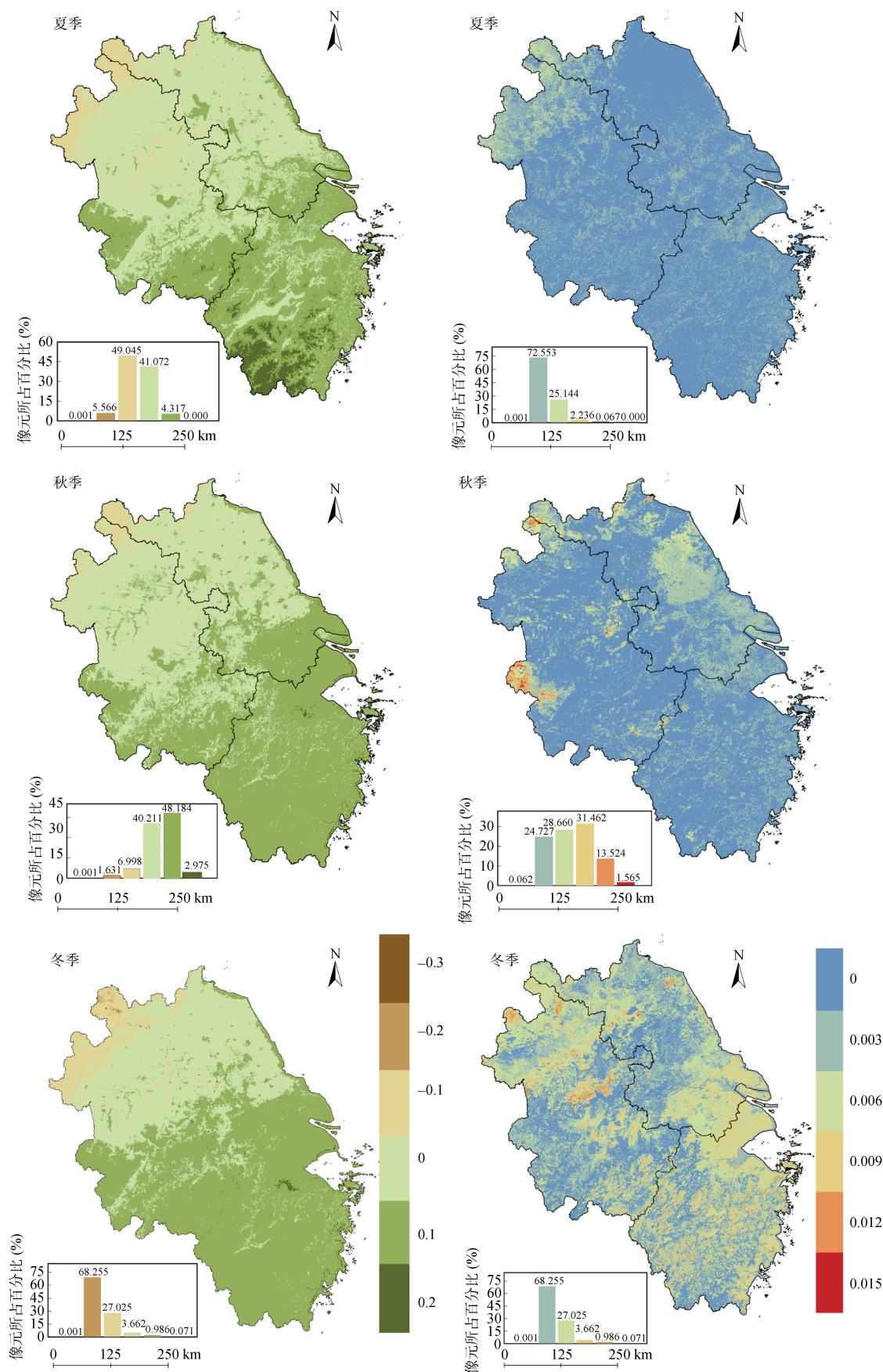


图 4 长三角不同季节土壤水分 MRD(A)及其 SDRD(B)的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of soil moisture MRD (A) and SDRD (B) in different seasons in Yangtze River Delta

数较高,使土壤水分时间稳定性降低。秋季 SDRD 高值区则分布在东北部沿海地区,这是因为该地区降水量小,蒸散发指数高且地下水埋深较深^[22],从而导致土壤水分时间稳定性较弱。冬季 SDRD 高值区位于中东部的太湖流域及其周边地区,可能是该区域河网密布,地下水埋深浅,导致了土壤水分波动剧烈。

2.3 土壤水分时间稳定性驱动因子

2.3.1 土壤水分时间稳定性对环境因子的响应 长三角地区土壤水分的 MRD 值随着地形、气象、植被、土壤等因素变化,呈现出不同的变化趋势(图 5)。土壤水分 MRD 值随着高程和坡度的升高而上升,并在高程 500 m 和坡度 15°后趋于平稳。如图 2A 和图 2B 所示,高程和坡度较高的区域大多分布在南部的丘陵山区,也是降水和植被条件较好的区域,但土壤水分 MRD 值随着地形湿度指数的升高没有明显的变化趋势(图 2C)。地形湿度指数是根据坡度、坡向和海拔等地形特征衡量可渗透和保留在土壤中的水量,该指数值高表明该区域为水可能积聚并保留在土壤中的区域。前人研究发现,在小尺度区域,地形湿度指数对土壤水分 MRD 值响应强烈^[23],但在长三角地区这种大尺度并且地形复杂区域,土壤水分 MRD 值受降水影响较大,和地形湿度指数相关性较弱。在气象因子方面,土壤水分 MRD 值随地表温度和蒸散发量的上升呈先降低后升高的趋势,但该变化规律并不明显。对应于年均地表温度 23℃ 和蒸散发量 500 mm 时,土壤水分 MRD 值最低(图 2D、图 2E)。地表温度高和蒸散发强烈的区域,大多同时具有较大的降水量^[24],因此土壤水分 MRD 值较高;地表温度低和蒸散发较弱的区域,由于土壤水分的损失较小^[25],使得土壤水分 MRD 值较高。降水量的升高使土壤水分 MRD 值上升,并在降水量达 1 500 mm 后趋于平稳。降水量最高值对应的区域分布在南部高海拔地区(图 2F),虽然降水量大,但高海拔土壤相对贫瘠且保水性差^[26],因此降水量增加对土壤水分的提升有限。土壤水分 MRD 值随夜间灯光指数的上升呈现升高的趋势。夜间灯光指数高的区域大多分布在浙北、太湖流域以及散布在南部丘陵山区的低洼地带(图 2H),这些区域都相对于长三角地区土壤水分值偏高。随着 NDVI 值的升高,土壤水分 MRD 值无明显的变化趋势,这主要是因为 NDVI 值较高的区域主要是林地和耕地,林地主要分布在南部地区而耕地主要分布在中部以及北部地区,使得长三角 NDVI 空间分布无明显地带性(图 2G)。在土壤质地方面,土壤水分 MRD 值随砂粒含量的增加平缓上升(图 2I),而随黏粒变化则

趋势相反(图 2J),这是由于黏粒含量低且砂粒含量高对应于南部土壤水分 MRD 值较高的丘陵山区。

土壤水分 SDRD 值对不同环境因子空间变化的响应不同(图 6)。当高程和坡度处于低值时土壤水分 SDRD 值偏高,这部分区域主要分布在地形平坦且水资源相对较少的皖北地区(图 2A)。皖北地区位于温带季风气候和亚热带季风气候的交界处,受季风气候影响,降水时间分布不均匀^[27],使得土壤水分波动较大。当地形湿度指数处于高值时,对应区域分布于低洼的湖泊河流地带(图 2C),此时土壤水分时间稳定性最高。在气象因子方面,土壤水分 SDRD 值随着地表温度升高呈现先上升后下降的趋势,这是因为地表温度低值区分布在南部和西部的高海拔地区(图 2D)。蒸散发量高值区也为南方丘陵地区(图 2E),且该区域的年均降水量和植被覆盖率高(图 2F、图 2G),土壤保水性好^[28],土壤水分时间上的波动较弱。年均降水量空间分布由北向南逐渐升高(图 2F),作为最重要的土壤水分来源,降水量大使得土壤水分波动剧烈,因此高降水量往往伴随着高土壤水分 SDRD 值。由于 NDVI 值空间分布差异小,土壤水分 SDRD 值总体对 NDVI 值响应较弱。夜间灯光指数和土壤水分 SDRD 值关系呈反向关系,夜间灯光指数低值对应皖北地区,土壤水分 SDRD 值相对较低。黏粒含量从北向南降低,砂粒含量则相反,黏粒含量的升高和砂粒含量的降低伴随着土壤水分 SDRD 值的上升,但这并不代表土壤质地在长三角地区这样一个空间尺度对土壤水分波动能够产生影响,而更多的是因为长三角区域土壤质地的空间分布与气象、植被等因子在空间变化具有一定的相似性。

长三角地区不同土地覆被类型之间土壤水分时间稳定性存在较大差异性(图 7)。林地土壤水分 MRD 值最高,其次是不透水面,而 MRD 值较低的是耕地和草地。土壤水分 SDRD 值则有相反的规律,林地 SDRD 值最低,不透水面的 SDRD 值次之,而耕地和草地的 SDRD 值最高。这是由于林地多分布于浙南一带降水量大的山区,高降水量的地区自然具有更高的土壤水分水平,且林地受树木冠层遮蔽以及林下苔藓层具有保水性^[29],使土壤水分的时间稳定性维持较好;而不透水面大多分布于相对低洼的汇水区,使土壤水分相对较高且时间波动较小;耕地因灌溉和耕作等活动可以增加土壤水分水平,但也会因灌溉实践和作物类型而发生变化;草地可能是因为依赖人工灌溉,灌溉的不稳定性使土壤水分 MRD 和 SDRD 值波动范围较大^[21]。

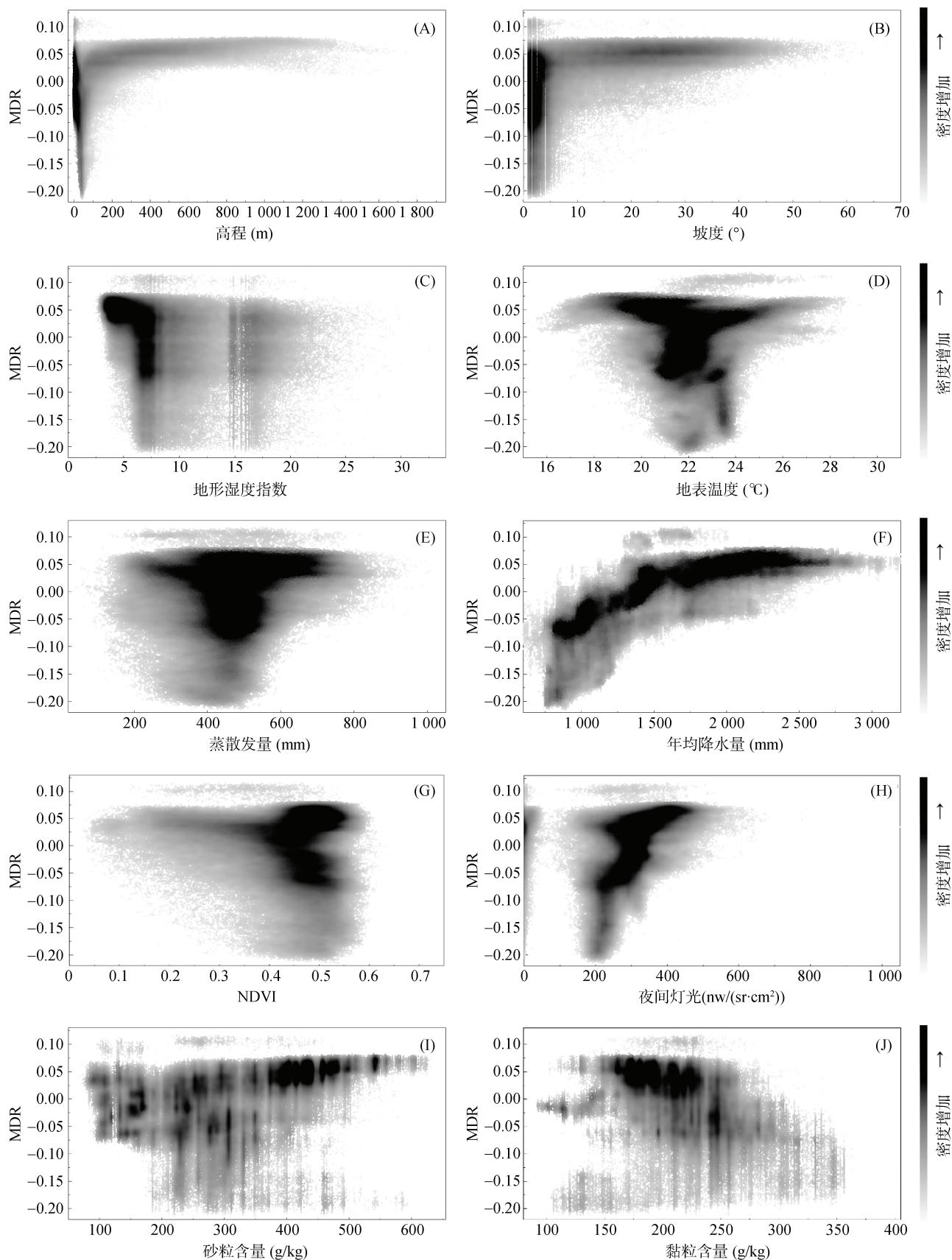


图 5 长三角土壤水分 MRD 值空间分布随环境因子变化的响应关系

Fig. 5 Response of spatial distribution of soil moisture MRD value to environmental factors in Yangtze River Delta

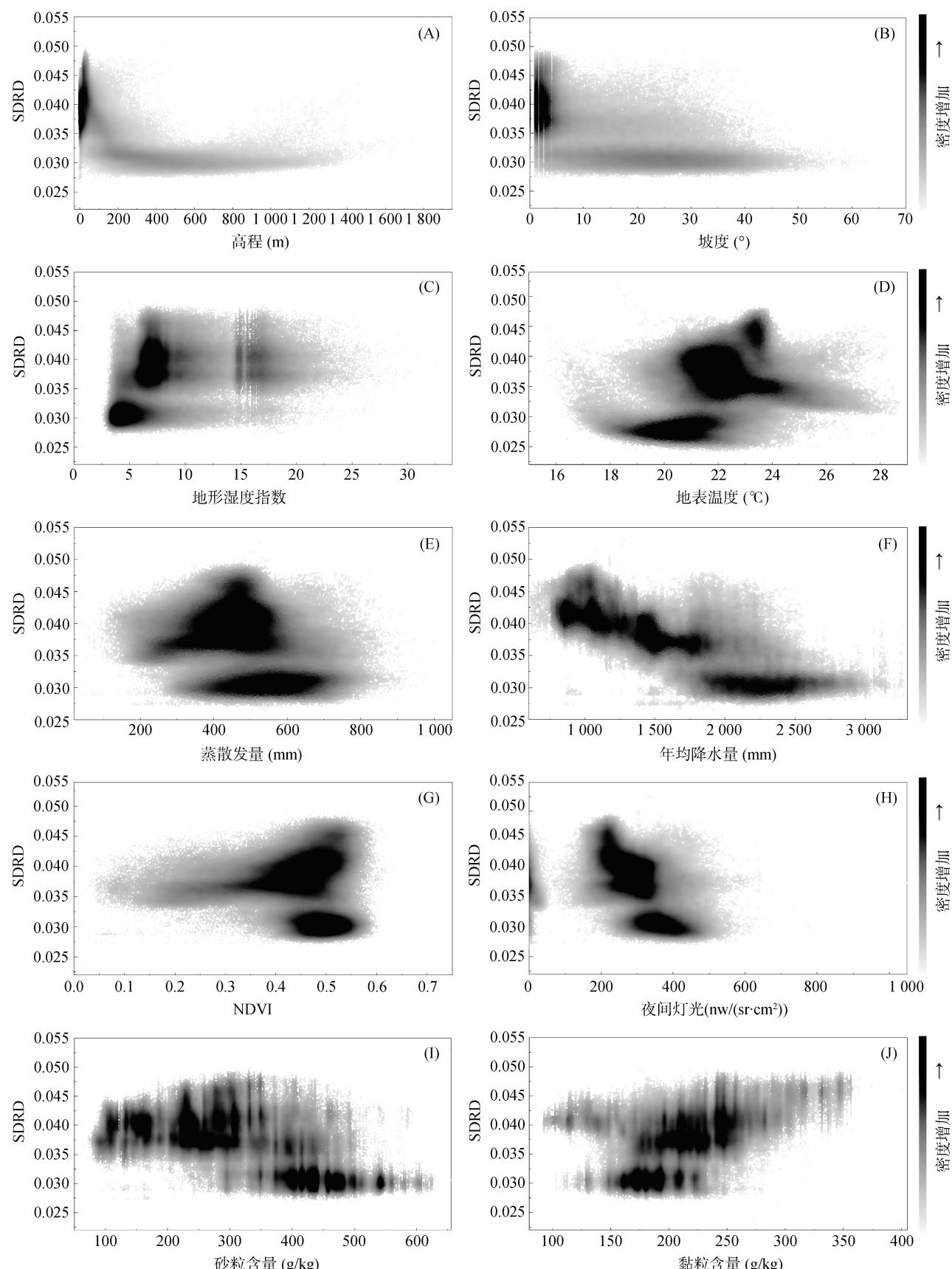


图 6 长三角土壤水分 SDRD 值空间分布随环境因子变化的响应关系

Fig. 6 Response of spatial distribution of soil moisture SDRD value to environmental factors in Yangtze River Delta

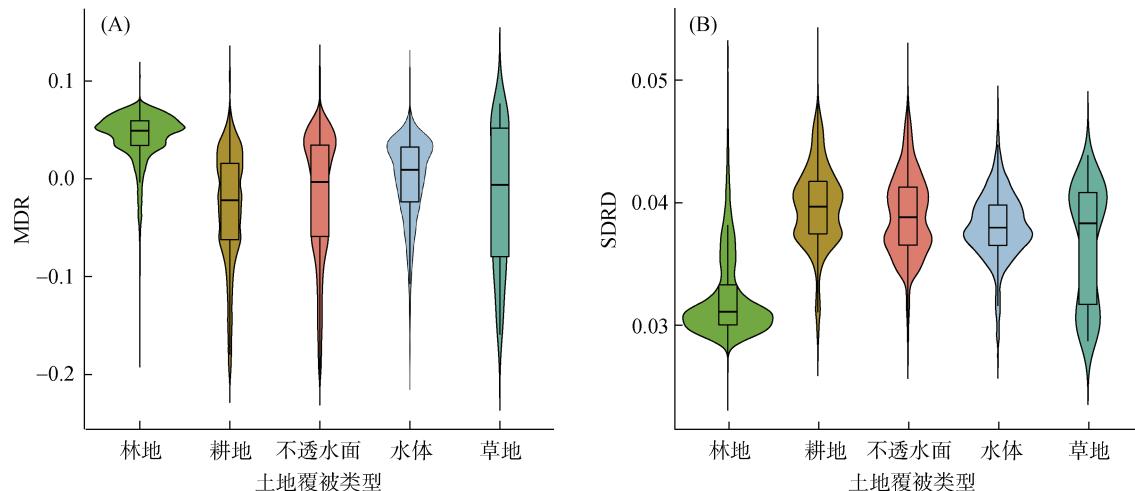


图 7 长三角不同土地覆被类型的土壤水分 MRD 和 SDRD

Fig. 7 Soil moisture MRD and SDRD values in different land cover types in Yangtze River Delta

2.3.2 环境因子重要性排序 各个环境因子在不同土地覆被类型和季节下, 对土壤水分 MRD 的贡献率既有相似性也有差异性(图 8)。在长三角区域内, 全年和春、秋、冬三季, 气象因子对土壤水分 MRD 值空间分布起决定性作用, 其次是地形因子和人类活动, 而贡献最低的是土壤质地, 但在夏季, 地形因子的重要性却强于气象因子。主要原因是全年和春秋冬三季的长三角地区降水空间分布不均匀, 温度和蒸散发量地区差异大, 所以气象因子对土壤水分 MRD 值分布贡献率最大。在夏季时, 降水量为全年峰值且南北空间差异较小, 而地形因素如坡度和海拔会对降水产生明显的再分配作用^[30], 因此夏季降水对土壤水分 MRD 值空间分布的贡献率降低。对于不透水面和耕地, 土壤水分 MRD 值对夜间灯光指数和 NDVI 值响应强烈。在一定程度上, 不透水面和耕地可以表征人类活动, 不透水面是人类活动影响剧烈的覆被类型, 耕地土壤水分则是因为受到种植作物类型和管理措施的影响, 因此两种土地覆被类型对夜间灯光指数和 NDVI 敏感。对于林地, 降水对土壤水分 MRD 影响较小, 地形因子在其中响应相对强烈。这是因为林地分布在南方丘陵地区, 降水空间分布差异小, 海拔和坡度变化大影响了土壤水分分布, 从而对土壤的干湿程度响应强烈。而草地相对于林地, 冠层覆盖较小, 并且分布在降水量相对较小的区域, 所以蒸散发量对土壤水分 MRD 重要性较强。

各变量对土壤水分 SDRD 的重要性如图 9 所示。

长三角区域内, 全年尺度上, 地形因子对土壤水分 SDRD 贡献最高, 气候因子和人类活动次之, 而重要性最低的是土壤质地。由于全年 SDRD 值相比于 4 个季节的 SDRD 值空间特征上有明显的变化规律(图 3B、图 4B), 所以各个环境因子对土壤水分 SDRD 的贡献率四季相比于全年变化差异更大, 主要表现为高程和降水不再对 SDRD 起决定性作用, 其余的环境因子的贡献率都有所提升。相比于其他季节, 秋季蒸散发量对土壤水分 SDRD 贡献率降低, 这与长三角秋季蒸散发量空间分布差距较小有关^[20]。对于不透水面, 降水量对土壤水分 SDRD 响应强烈, 这和王强等^[31]在长三角地区得出的结论一致。城镇用地由于土壤存在严重压实现象, 孔隙度降低, 保水性较差, 其土壤水分含量波动相对于其他下垫面对降水的响应起伏较大。对于耕地, 降水量对土壤水分 SDRD 贡献率高, 这与耕地广泛分布于整个长三角地区, 其降水空间分布差异较大有关。对于林地, 坡度和地形湿度指数对土壤水分 SDRD 响应敏感, 林地坡度跨度大, 陡坡处土壤水分流失较快, 缓坡和地势平坦的地区会接收上坡位的补给^[32], 影响了土壤水分的时间稳定性。对于草地, 气候因子和土壤质地对土壤水分 SDRD 响应强烈, 一方面是因为草地零散分布在长三角整个区域内, 降水时空分布不均匀, 导致土壤水分的空间异质性强; 另一方面是因为草地土壤持水性会受土壤质地的控制, 使浅层土壤含水量波动受较大的影响^[33]。

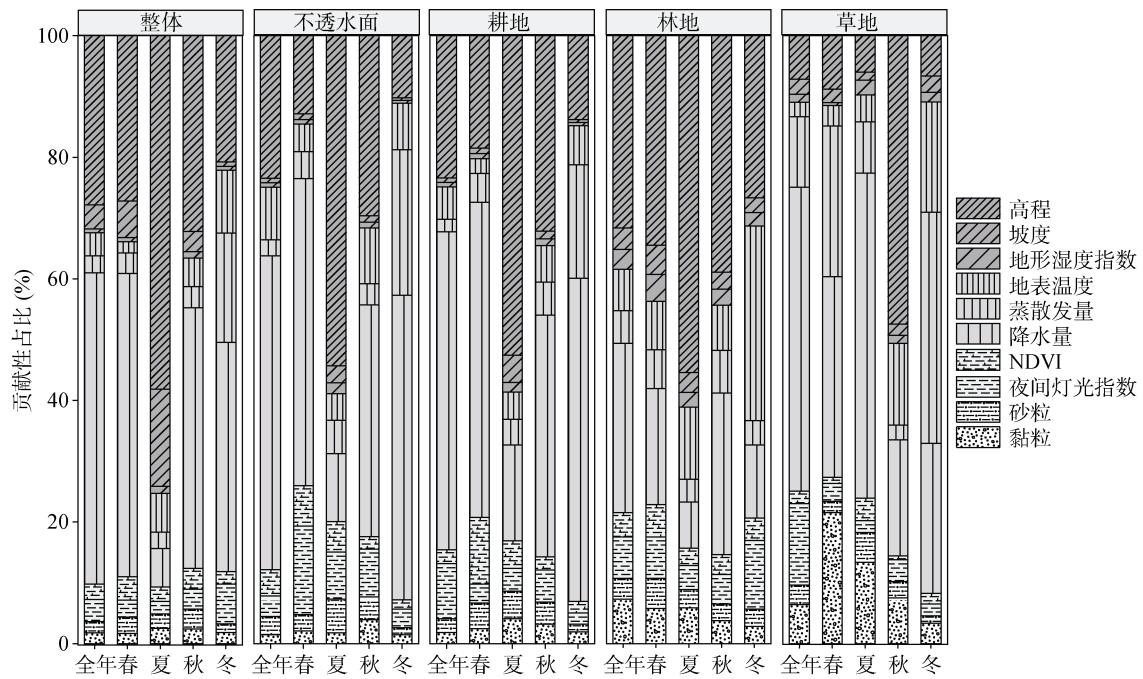


图 8 长三角环境因子对土壤水分 MRD 的重要性

Fig. 8 Importance of environmental factors on soil moisture MRD in Yangtze River Delta

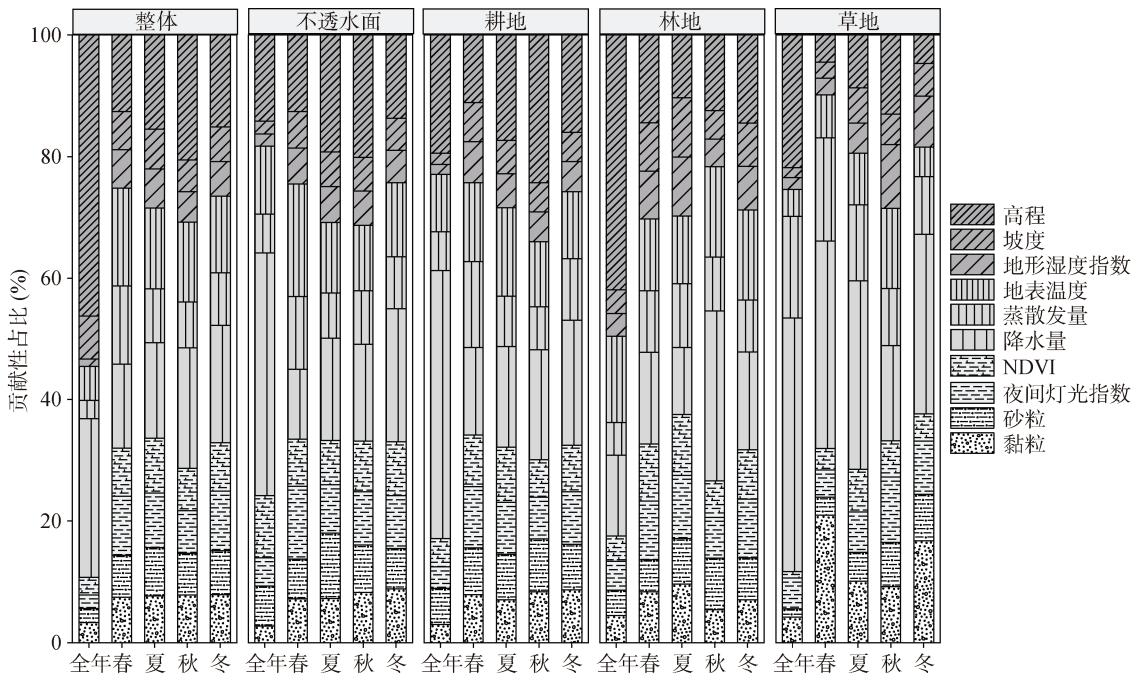


图 9 长三角环境因子对土壤水分 SDRD 的重要性

Fig. 9 Importance of environmental factors on soil moisture SDRD in Yangtze River Delta

3 结论

1) 年际变化上, 土壤水分 MRD 值由南向北逐渐递减, SDRD 值空间分布则相反, 其中南部的浙江金华、衢州一带 SDRD 值也偏高。

2) 年内季节变化上, 春季和冬季土壤水分 MRD 值空间变化相较于夏季和秋季更为剧烈, 除冬季外,

其余季节由北向南 MRD 值逐渐升高; 土壤水分 SDRD 值则季节性空间变化规律不显著。

3) 根据土壤水分 MRD 和 SDRD 随着地形、气象、植被、土壤等因素的变化趋势, 发现土壤水分 MRD 空间分布和高程、坡度以及降水量分布大致相同, SDRD 分布则与其相反。NDVI、地形湿度指数和土壤质地对土壤水分 MRD 影响较小。土壤水分

MRD 值分布区间为林地>不透水面>耕地>草地, SDRD 值分布区间则相反。

4) 通过随机森林算法计算长三角整体以及不同土地覆被类型环境因子重要性可以得出, 土壤水分 MRD 和 SDRD 受地形因子和气候因子影响较大, 但各个环境因子在不同的季节和土地覆被类型上影响程度不同。

参考文献:

- [1] 李禹凝, 王金满, 张雅馥, 等. 干旱半干旱煤矿区土壤水分研究进展[J]. 土壤, 2023, 55(3): 494–502.
- [2] 郑超磊, 胡光成, 陈琪婷, 等. 遥感土壤水分对蒸散发估算的影响[J]. 遥感学报, 2021, 25(4): 990–999.
- [3] Brocca L, Tullo T, Melone F, et al. Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability[J]. Journal of Hydrology, 2012, 422: 63–75.
- [4] Vachaud G, Passerat De Silans A, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(4): 822–828.
- [5] Martínez G, Pachepsky Y A, Vereecken H. Temporal stability of soil water content as affected by climate and soil hydraulic properties: A simulation study[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(4): 1899–1915.
- [6] 朱青, 史伯强, 廖凯华. 基于聚类和时间稳定性的土壤含水量优化监测[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 74–79.
- [7] Wang X P, Pan Y X, Zhang Y F, et al. Temporal stability analysis of surface and subsurface soil moisture for a transect in artificial revegetation desert area, China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 507: 100–109.
- [8] 徐露, 张丹, 向宇国, 等. 季节性干旱区紫色土坡耕地土壤水分对降雨的响应[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 37–45.
- [9] Penna D, Brocca L, Borga M, et al. Soil moisture temporal stability at different depths on two alpine hillslopes during wet and dry periods[J]. Journal of Hydrology, 2013, 477: 55–71.
- [10] 辛强, 李兆富, 李瑞娟, 等. 基于温度植被干旱指数的华东地区 AMSR-E 土壤水分数据的空间降尺度研究[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(5): 956–963.
- [11] Li L Y, Zhu Q, Liu Y, et al. Fusing satellite-based surface soil moisture products over a typical region with complex land surface characteristics[J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128158.
- [12] 彭守璋. 中国 1 km 逐月潜在蒸散发数据集 (1990—2021)[DB]. 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2022.
- [13] Song X D, Brus D J, Liu F, et al. Mapping soil organic carbon content by geographically weighted regression: A case study in the Heihe River Basin, China[J]. Geoderma, 2016, 261: 11–22.
- [14] Jacobs J M, Mohanty B P, Hsu E C, et al. SMEX02: Field scale variability, time stability and similarity of soil moisture[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(4): 436–446.
- [15] Nguyen J M, Jézéquel P, Gillois P, et al. Random forest of perfect trees: Concept, performance, applications and perspectives[J]. Bioinformatics, 2021, 37(15): 2165–2174.
- [16] 林楠, 姜然哲, 刘强, 等. 近 20 年三江平原地表蒸散发时空特征及驱动因素分析[J]. 中国地质, 2021, 48(5): 1392–1407.
- [17] 严登明, 翁白莎, 王俊锋, 等. 皖北地区“蒸发悖论”探讨[J]. 人民黄河, 2017, 39(4): 21–24.
- [18] 王国杰, 娄丹, 谭龚, 等. 长江中下游地区 1988—2010 年遥感土壤湿度的时空变化[J]. 大气科学学报, 2018, 41(2): 228–238.
- [19] 娄丹. 卫星遥感土壤湿度的时空分布及其对大气降水反馈作用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [20] 杨秀芹, 王磊, 王凯. 基于 MOD16 产品的淮河流域实际蒸散发时空分布[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1343–1352.
- [21] Soothar R K, Singha A, Soomro S A, et al. Effect of different soil moisture regimes on plant growth and water use efficiency of sunflower: Experimental study and modeling[J]. Bulletin of the National Research Centre, 2021, 45(1): 121.
- [22] 莫兴国, 刘苏峡, 林忠辉, 等. 华北平原蒸散和 GPP 格局及其对气候波动的响应[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 589–598.
- [23] Zhu Q, Lin H S. Simulation and validation of concentrated subsurface lateral flow paths in an agricultural landscape[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(8): 1503–1518.
- [24] Das S, Datta P, Sharma D, et al. Trends in temperature, precipitation, potential evapotranspiration, and water availability across the Teesta river basin under 1.5 and 2 °C temperature rise scenarios of CMIP6[J]. Atmosphere, 2022, 13(6): 941.
- [25] Wang S, Fu B J, Gao G Y, et al. Soil moisture and evapotranspiration of different land cover types in the Loess Plateau, China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(8): 2883–2892.
- [26] 潘红丽, 李迈和, 蔡小虎, 等. 海拔梯度上的植物生长与生理生态特性[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 722–730.
- [27] 王胜, 石磊, 谢五三, 等. 基于降水集中度方法的安徽省主汛期降水时空特征分析[J]. 中国农业气象, 2010, 31(4): 507–511.
- [28] Yang W T, Long D, Bai P. Impacts of future land cover and climate changes on runoff in the mostly afforested river basin in North China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 201–219.
- [29] 陈仁升, 阳勇, 韩春坛, 等. 高寒区典型下垫面水文功能小流域观测试验研究[J]. 地球科学进展, 2014, 29(4): 507–514.
- [30] Wang L, Chen R S, Song Y X, et al. Precipitation–altitude relationships on different timescales and at different precipitation magnitudes in the Qilian Mountains[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 134(3): 875–884.
- [31] 王强, 许有鹏, 于志慧, 等. 快速城市化地区多尺度水文观测试验与暴雨洪水响应机理分析[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 743–753.
- [32] 杨艳刚, 江源, 张文涛, 等. 山西芦芽山林线附近土壤水分空间分布特征及其影响因素[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(2): 120–127.
- [33] 丁运韬, 程煜, 张体彬, 等. 滴灌灌水下限对夹砂层农田土壤水盐分布和玉米生长的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 733–744.