

中国耕地土壤相对湿度时空分异

潘汉雄¹, 朱国锋^{1,2,3}, 张昱¹, 郭慧文¹, 雍磊磊¹,
万巧卓¹, 马惠莹¹, 李森⁴

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 3. 甘肃省土地利用与综合整治工程研究中心, 兰州 730070;
4. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 以全国653个农业气象站1993-2013年耕地的土壤相对湿度数据为基础, 运用地统计方法, 分析中国耕地土壤相对湿度时空分异特征与规律。结果表明: 自1993年以来全国耕地的土壤相对湿度呈现波动上升趋势。全国耕地的土壤相对湿度普遍大于60%, 分布区域自4月中旬开始随夏季风推移不断向北向西扩大, 自10月下旬开始向东、南方向缩小。耕地土壤相对湿度值随土壤深度的增加而增加。年际尺度上, 耕地的土壤相对湿度在夏秋季上升速度最快, 变化幅度随土层深度增加而变小。土壤相对湿度与降水量存在较强的正相关关系, 与潜在蒸发量、气温普遍存在较强的负相关关系。土壤相对湿度与各气象要素的相关性随深度加深而减弱。春、夏、秋季气象因素对旱地土壤相对湿度影响较大, 冬季气象因素对水田影响更大。

关键词: 土壤相对湿度; 耕地; Kriging插值法; 相关性分析; 时空分异
DOI: 10.11821/dlxb201901009

1 引言

土壤能够供应和协调农作物正常生长发育所需要的水分、养分、空气和热量, 是农作物生长发育的基础, 其理化性质容易受到气候变化的影响^[1]。在农情监测领域, 土壤湿度是土壤水分状况的综合反映, 可以直观地反映农田干旱程度^[2-4]。同时, 土壤湿度是陆面过程研究中的重要参量, 土壤湿度可以通过改变地表向大气输送的感热、潜热和长波辐射通量来影响气候变化^[5-7]。因此, 分析不同时空背景下各土层土壤相对湿度的时空分异特征与规律, 对掌握耕地土壤墒情、科学利用土壤水资源, 进而开展陆面过程系统研究显得非常重要。

近年来许多研究利用实测数据资料针对土壤相对湿度的变化特征及影响因素进行过

收稿日期: 2017-10-31; 修订日期: 2018-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41661005, 41867030); 中国博士后科学基金项目(2016T90961); 国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金项目(41421061); 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题(SKLCs-ZZ-2017); 农业农村部休耕轮作制度试点遥感监测专项(SCZG2017-ZB-2187/1-HT) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41661005, No.41867030; Chinese Postdoctoral Science Foundation, No.2016T90961; National Natural Science Foundation Innovation Research Group Science Foundation of China, No.41421061; Autonomous Project of the State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, No.SKLCs-ZZ-2017; Remote Sensing Monitoring Special Project of Rotation and Fallow System in Pilot Regions under Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, No.SCZG2017-ZB-2187/1-HT]

作者简介: 潘汉雄(1993-), 男, 浙江金华人, 硕士生, 研究方向为水文与水资源。E-mail: panhxnwnu@163.com

通讯作者: 朱国锋(1983-), 男, 甘肃平凉人, 博士, 副教授, 中国地理学会会员(S110012212M), 研究方向为水文与水文学。E-mail: gfzhu@lzb.ac.cn

一系列的研究。目前的研究成果主要是探讨气象要素^[8-11]、土壤性质^[12-17]、土地覆被类型^[16, 18-19]、土层厚度^[8, 20]等要素与研究区域土壤相对湿度的相互关系, 研究特定区域土壤相对湿度的时空变化特征及趋势。国内热点地区主要集中在西北干旱区^[21-24]、东部季风区^[14-15]、黄土高原^[10, 25]、横断山区^[2]、黄河中下游^[11, 17, 26]等水文和气象观测资料相对丰富的地区。青藏高原区由于观测站点稀少, 以基于实测数据的点状研究为主^[27-28]。近年来, 基于遥感技术的多种反演手段成为研究大尺度土壤湿度的有效方法^[29-30], 但是目前各种反演资料本身都存在较大的不确定性, 在短期内仍无法替代实测数据。

本研究采用地统计学的方法探究中国耕地在1993-2013年期间土壤相对湿度的时空分异特征及规律。研究可形成土壤相对湿度的基础资料, 为开展基于遥感技术的土壤墒情监测提供对比验证数据, 为构建区域陆面过程模型提供所需的输入参数, 为农业、林业等管理部门的科学决策提供支持。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

基于1993-2013年全国778个农业观测站点土壤相对湿度的逐旬数据, 选取时间连续性、位置代表性较好且通过Mann-Kendall趋势检验的653个站点开展研究, 其中数据时间序列始于2002年之前的站点为338个, 始于2002年(含)之后的站点为315个(图1)。由于青藏高原站点稀少, 所以将拉萨、林芝、甘德、湟源、门源、诺木洪、曲麻菜、格尔木、泽当、日喀则、民和、德令哈、贵德、河南等14个数据状况相对欠佳的站点也选为分析站点作为补充。土壤相对湿度及气象要素数据均来自于国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/site/index.html>), 所有气象数据通过Mann-Kendall趋势检验, 耕地空间分布数据来自资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/data.aspxDATAID=99>), 一级农业区的划分依据为《中国综合农业区划》^[31]。

对1993-2013年期间, 各站点10 cm、20 cm和50 cm三个土层土壤相对湿度的逐旬数据进行整理。计算得出每个站点在1993-2013年期间, 各土层的各季节多年平均值及多

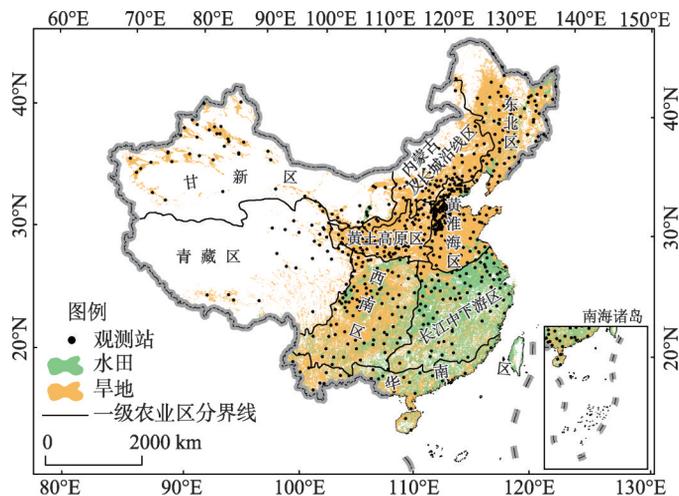


图1 中国土壤相对湿度观测站分布

Fig. 1 Distribution of relative soil moisture observation stations in China

年年平均值。计算方法为:

$$R_{(h,s)} = \left[\sum_{i=1993}^{2013} \sum_{j=n}^m (X_{ij} + Y_{ij} + Z_{ij}) \right] / (N_X + N_Y + N_Z) \quad (1)$$

式中: h 表示土层厚度 (10 cm、20 cm、50 cm); s 表示时间尺度 (多年春季平均、多年夏季平均、多年秋季平均、多年冬季平均、多年年平均); i 表示 1993-2013 年期间的年份; j 表示所需时间尺度包括的月份, n 为 j 开始的月份, m 为 j 结束的月份; N_X 、 N_Y 与 N_Z 分别表示在 1993-2013 年期间各月的上旬、中旬、下旬存在观测数据的旬数。对各站点的计算结果按照农业分区进行 Kriging 插值计算与分析讨论。

对各站点 10 cm、20 cm 和 50 cm 三个土层各季节土壤相对湿度的逐年平均值、年平均均值 $R_{(h,i)}$ 分别建立与时间 (t_i) 之间的一元线性回归方程, 公式为:

$$R_{(h,i)} = a + bt_i \quad (2)$$

式中: i 表示年份; a 为常数; b 为土壤相对湿度各季节年际变化的倾向率。 $b > 0$, 倾向率为正表示土壤相对湿度呈逐年上升趋势; $b < 0$, 倾向率为负则说明呈逐年下降趋势。

2.2 方法

由于各观测点农作物类型、灌溉时间和类型、降水和蒸发等气象因子复杂多样, 在较大空间尺度上无法使用统一的农作物蒸散发系数, 因此选择使用潜在蒸发量作为气象因子之一进行分析。各站点的潜在蒸发量根据研究期间的日最高气温、日最低气温、日平均气温、平均相对湿度、平均风速及日照时数等 6 个气象要素的逐日数据, 使用世界粮农组织 (FAO) 1998 年修正的彭曼—蒙蒂斯 (Penman-Monteith) 模型计算得出^[32-33]。

研究土壤水分与环境因子之间关系大多采用 ArcGIS 软件中地统计分析模块下的 Kriging 插值方法, 该方法基于空间相关模型^[34], 其优势是在地形、气象因子异质性较大时有较强的适用性, 既能够体现地理要素在较大时空尺度上的一致性, 又能体现出区域的独特性^[34-35]。

3 结果分析

3.1 土壤相对湿度的空间分布

从土壤相对湿度的多年平均值空间分布来看 (图 2), 全国耕地的土壤相对湿度值普遍大于 60%, 并且存在区域间、土层间和季节性的空间分布差异。

10 cm 深度的土层。春季, 土壤相对湿度值小于 60% 的区域主要分布在黄土高原农业区、内蒙古及长城沿线农业区、西南农业区的西南部、华南农业区的珠三角、长江中下游农业区的杭州湾沿岸、黄淮海农业区的中北部、甘新农业区的宁夏平原, 其他区域土壤相对湿度值均大于 60%, 其中东北农业区的东部、长江中下游农业区的大部、西南农业区东部土壤相对湿度值大于 80%。夏季, 除甘新区、黄土高原区、内蒙古及长城沿线区、黄淮海区的黄河三角洲附近外, 其他农业区土壤相对湿度值普遍大于 60%。在长江中下游区中部, 东北区南部土壤相对湿度相比春季大于 80% 的范围有所减小, 黄淮海区的东南部、西南区与华南区交界的广大区域土壤相对湿度较春季明显上升。秋季, 土壤相对湿度值小于 60% 的区域除西南区与长江中下游区的交界处有零星分布外, 主要分布在长江以北地区, 并呈自东向西缩小的趋势; 土壤相对湿度大于 80% 的区域分布在东北区东部、西南区大部、长江中下游区西南部与东北部、黄淮海区东南部等地。冬季, 土壤相对湿度小于 60% 的区域明显扩大, 甘新区的天山北部、青藏区的东北部、内蒙古及长城沿线区大部土壤相对湿度小于 45%; 土壤相对湿度值大于 80% 的区域在西南区呈

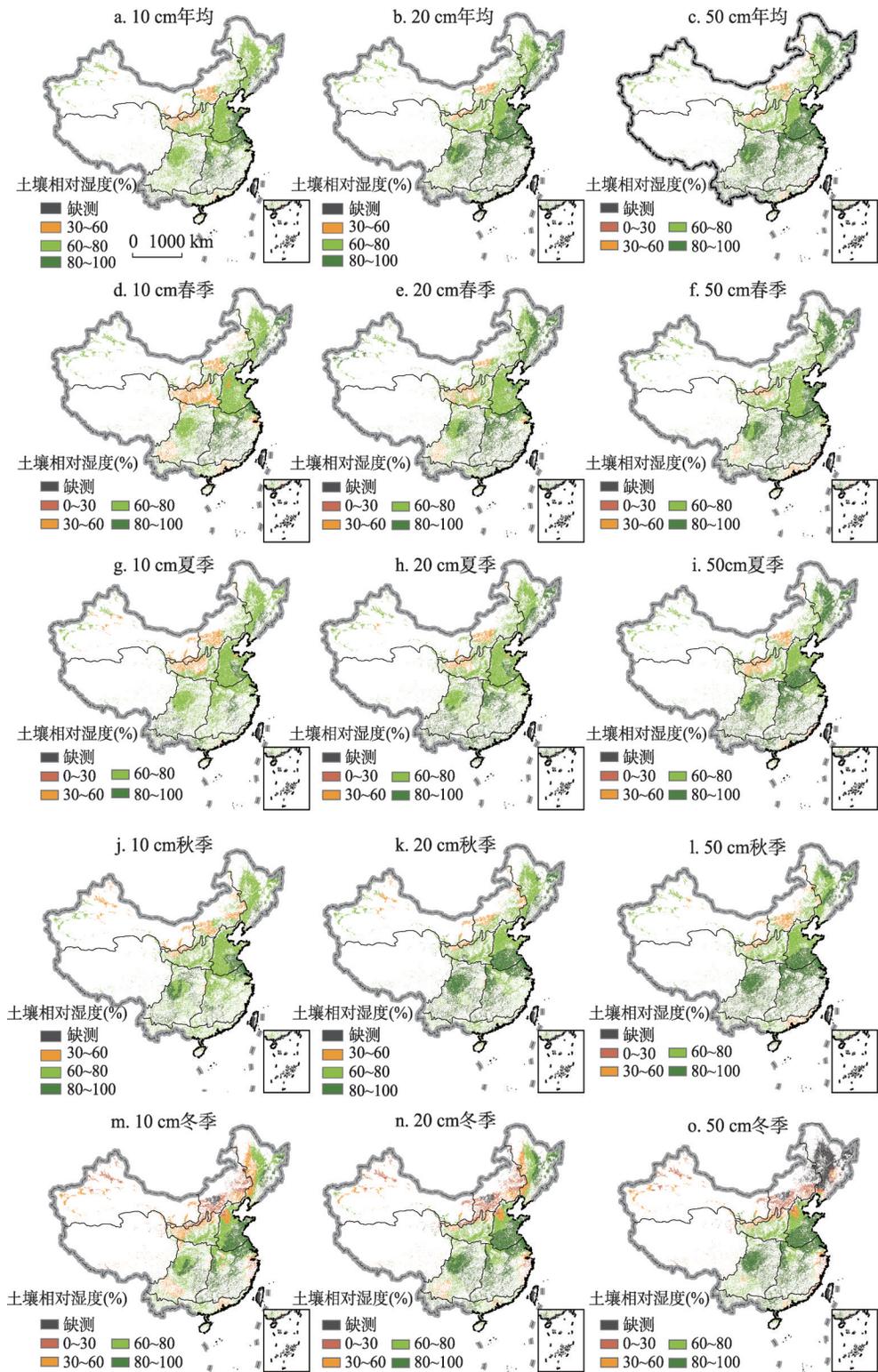


图2 中国耕地土壤相对湿度空间分布状况

Fig. 2 Distribution of relative soil moisture in farmland in China

缩小的趋势,在长江中下游区、黄淮海区、东北区则呈现出不同程度的扩大趋势。从该土层土壤相对湿度的多年平均值来看,小于60%的区域主要分布在甘新区、黄土高原区、内蒙古及长城沿线区的交界处,在甘新区的天山南北麓,内蒙古及长城沿线区的中部也有分布。

20 cm深度的土层。春季,土壤相对湿度值小于60%的区域主要分布在西南区、内蒙古及长城沿线区的西南部、黄土高原区的中西部、长江中下游区的杭州湾沿岸。其中,西南区的西南部零星地出现小于30%区域。其他区域的土壤相对湿度值均大于60%,其中东北区的东部、黄淮海区的黄河三角洲附近、长江中下游区大部、西南区大部、华南区大部土壤相对湿度大于80%。夏季,土壤相对湿度值小于60%的区域集中分布在黄土高原区的陇东地区、内蒙古及长城沿线区西南部,而在黄淮海区的黄河入海口附近、甘新区的天山南部及银川平原存在零星分布。土壤相对湿度大于80%的区域在东北区、长江中下游区呈减少趋势,在黄淮海区、华南区、西南区有所扩大。秋季,土壤相对湿度值小于60%的区域,在黄土高原区、内蒙古及长城沿线区、黄淮海区进一步缩小,但在甘新区、西南区与长江中下游区交界处呈扩大趋势。土壤相对湿度大于80%的区域在黄淮海区南部、长江中下游区、西南区、黄土高原区南部、青藏区东部呈明显扩大趋势,而在华南区、东北区缩小。冬季,土壤相对湿度小于60%的区域明显扩大,主要分布在甘新区大部、青藏区大部、内蒙古及长城沿线区大部、东北区西部、西南区的西南部、长江中下游区的闽浙沿海、华南区的珠江口,其中在内蒙古及长城沿线区大部、青藏区大部、长江中下游区的闽浙沿海、甘新区的西部、黄淮海区的西北部土壤相对湿度小于30%;土壤相对湿度大于80%的区域相比秋季变动不大。从多年平均值来看,土壤相对湿度低于60%的区域集中分布在黄土高原区东北部、内蒙古及长城沿线区的西南部,其中华南区大部、长江中下游区大部、黄淮海区东部、东北区东部、西南区东部存在土壤相对湿度值大于80%的区域。

50 cm深度的土层。春季,土壤相对湿度值小于60%的区域主要分布在黄土高原区与内蒙古及长城沿线区的交界处、西南区的西南部、华南区的中东部,此外在内蒙古及长城沿线区的北部、长江中下游区的杭嘉湖平原零星分布,其他区土壤相对湿度均大于60%。在东北区、华南区、长江中下游区、西南区、黄淮海区东南部部分区域大于80%。夏季,土壤相对湿度值小于60%的区域在长江以南呈减少趋势,以北则呈扩大趋势,在华南区、西南区和长江中下游区已无明显分布,而在黄土高原区、内蒙古及长城沿线区扩大趋势明显;其余耕地的土壤相对湿度值均大于60%,其中数值大于80%的耕地除在甘新区减少外,其他农业区均有所扩大。秋季,土壤相对湿度小于60%的区域在长江以北的各农业区均有分布,在华南区东部也存在大面积分布,其与长江中下游的交界处甚至小于40%,其他农业区土壤相对湿度均大于60%,其中大于80%的区域集中分布在东北区大部、长江中下游区大部、西南区大部、黄淮海区南部,在黄土高原区南部也存在零星分布。冬季,土壤相对湿度小于60%的区域在各一级农业区均有所分布,黄淮海区南部、华南区中西部、长江中下游区大部、西南区大部土壤相对湿度大于80%。从多年年均值来看,土壤相对湿度值小于60%的区域主要集中在黄土高原区、内蒙古及长城沿线区,其他区域土壤相对湿度均大于60%。

从季节变化来看,全国耕地土壤相对湿度的高值区在不同深度的土层中均呈现随夏季风的推移不断向北、向西扩大的趋势,即高值区增大,低值区逐渐减小。高值区的分布范围在秋季达到最大,而低值区的分布在冬季最大。从高值区的分布情况来看,各季节均在50 cm土层分布最为广泛。

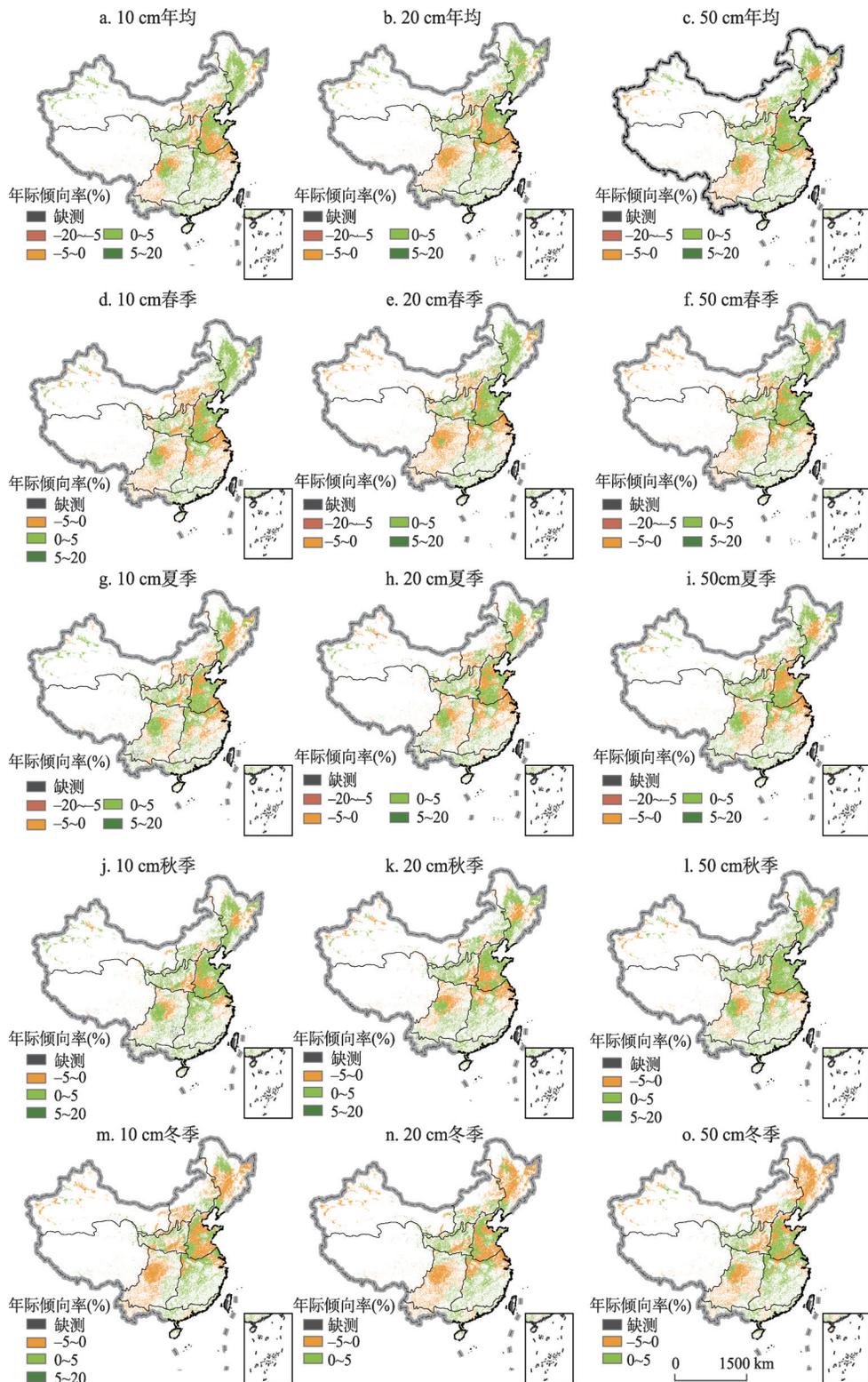


图3 中国耕地土壤相对湿度年际倾向率的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of interannual variability of relative soil moisture in farmland in China

3.2 土壤相对湿度年际变化的空间差异

从季节平均值、年平均值的年际变化(图3)来看,1993-2013年期间全国耕地年际倾向率变化范围普遍在-2.9%~5%之间,年际倾向率的正值区与负值区在全国呈现交错分布,并且存在季节性差异。

春季,青藏区、东北区、西南区、甘新区等农业区中年际倾向率为负值的区域随着土层加深而扩大,内蒙古及长城沿线区、黄土高原区、长江中下游区的正值区随土层加深而扩大,华南区各土层间的正负值空间分布体现出良好的一致性,滇桂边界以西的年际倾向率主要为负,以东区域主要为正。夏季,西南区、黄淮海区、长江中下游区的负值区范围随土层加深而扩大。长江中下游区中部10 cm土层、甘新区天山北部20 cm土层出现了倾向率为-20%/a~-5%/a的区域。秋季,年际倾向率为0~5%/a的耕地分布范围达到最广,华南区的耕地各土层未出现负值区域且均在0~5%/a的变化范围之内,并且在华南区的东部出现了年际倾向率为5%/a~20%/a的区域,其他农业区的正负值区域则呈现出交错相间分布的特点。冬季,年际倾向率为负值的分布区域比其他季节更加广泛,集中分布在东北区、甘新区、内蒙古及长城沿线区、黄淮海区和西南区,而华南区的珠江口以西及与西南区交界处首次出现了年际倾向率为负的区域。从年均值的年际变化来看,西南区、青藏区大部均存在各土层倾向率为负的区域,甘新区与内蒙古及长城沿线区的交界处,长江中下游区与黄淮海区的交界处,黄淮海区、黄土高原区与内蒙古及长城沿线区的交界处各土层均存在负值区,随土层深度加深,负值区在各农业区的分布均呈自东南向西北扩大的趋势。

从不同季节的变化趋势来看,全国年际倾向率为负的区域在冬季分布最为广泛。在夏秋两季,各农业区的年际倾向率以正值为主。

3.3 土壤相对湿度的年际变化

全国耕地土壤相对湿度年均值的年际变化(图4)具有较强的规律性。各农业区不同深度土层年均值的变化趋势具有较强的一致性。华南区的变化幅度大于其他农业区。长江中下游区、西南区的土壤相对湿度值整体高于其他农业区。黄土高原区、内蒙古及长城沿线区、甘新区的耕地土壤相对湿度明显低于其他农业区,内蒙古及长城沿线区各土层间的差异较小。

东北区10 cm、20 cm和50 cm深度的土层,土壤相对湿度的年际倾向率分别为0.18%/a、0.14%/a、0.011%/a,甘新区各土层分别为0.26%/a、-0.15%/a、-0.09%/a,华南区各土层分别为1.04%/a、0.51%/a、0.24%/a,黄淮海区各土层分别为-0.31%/a、-0.35%/a、-0.37%/a,黄土高原区各土层分别为0.017%/a、0.049%/a、0.028%/a,内蒙古及长城沿线区各土层分别为-0.020%/a、0.079%/a、-0.022%/a,青藏区各土层分别为0.21%/a、0.20%/a、0.0084%/a,西南区各土层分别为0.0026%/a、-0.16%/a、-0.005%/a,长江中下游区各土层分别为0.14%/a、0.08%/a、0.15%/a。自1993年以来,全国各农业区中,除黄淮海区各土层土壤相对湿度的年际倾向率为负,其他各农业区的土壤相对湿度普遍呈现出增长的趋势。土壤相对湿度增速最快的是华南区20 cm深度的土层,最慢的是西南区10 cm深度的土层。土壤相对湿度最大的负倾向率出现在黄淮海区50 cm深度的土层,最小则出现在西南区50 cm深度的土层。

3.4 土壤相对湿度的逐月变化情况

各月土壤相对湿度值均随着土层深度的加深而增加(图5)。土壤相对湿度的逐月变化趋势存在区域性差异,但同一农业区各土层的逐月变化趋势有较强的一致性。逐月变化的幅度也存在明显的区域性差异,长江中下游区、东北区、青藏区的变幅相对较小,

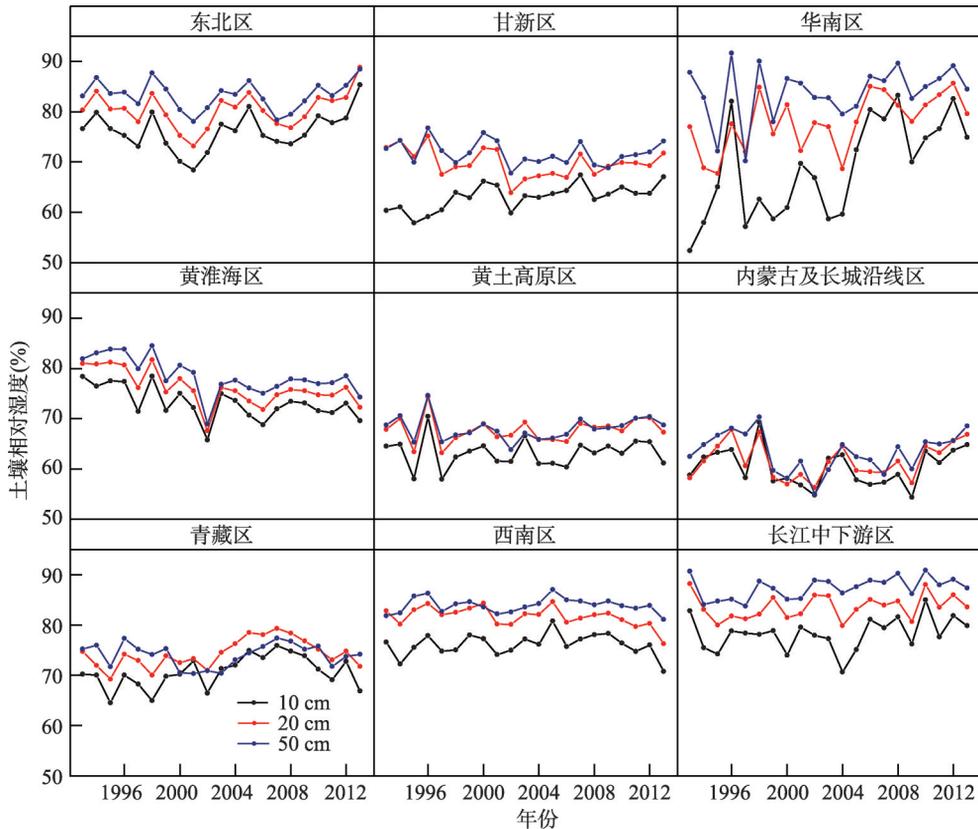


图4 中国不同农业区耕地土壤相对湿度年际变化

Fig. 4 Interannual variation of relative soil moisture in different agricultural areas of China

甘新区、华南区、内蒙古及长城沿线区的变幅较大，各区土壤相对湿度的变幅基本呈现出随着土层深度的加深而减小的规律。内蒙古及长城沿线区各月不同深度土层的土壤相对湿度值整体低于其他农业区。

4 讨论

4.1 主要气象要素对土壤相对湿度的影响

春季，除甘新区的河西走廊西段部分耕地土壤相对湿度与降水量呈负相关关系外，其他各农业区耕地土壤相对湿度普遍与降水量呈正相关（图6），其中长江中下游区大部、华南区大部、黄淮海区大部、内蒙古及长城沿线区大部、东北区东部、青藏区西南部、黄土高原区南部、西南区东部等区域的土壤相对湿度均与降水量存在较强的正相关关系，其相关系数在0.3~0.7之间。夏季，正相关区域进一步扩大且相关性较强。秋季，土壤相对湿度与降水量正相关性较强的区域在东北区、长江中下游区、黄淮海区、黄土高原区有所扩大，在西南区、华南区、甘新区减少。冬季，土壤相对湿度与降水量呈较强正相关的区域集中分布在华南区大部与西南区的西南部，此外在东北区与内蒙古及长城沿线区的交界处有零星分布。土壤相对湿度与降水量呈负相关的区域在中国非季风区有零星分布，主要是因为冬季非季风区降水以降雪为主，水分不会立即下渗至土壤，且土壤冻结后对降水的吸收能力大大降低。

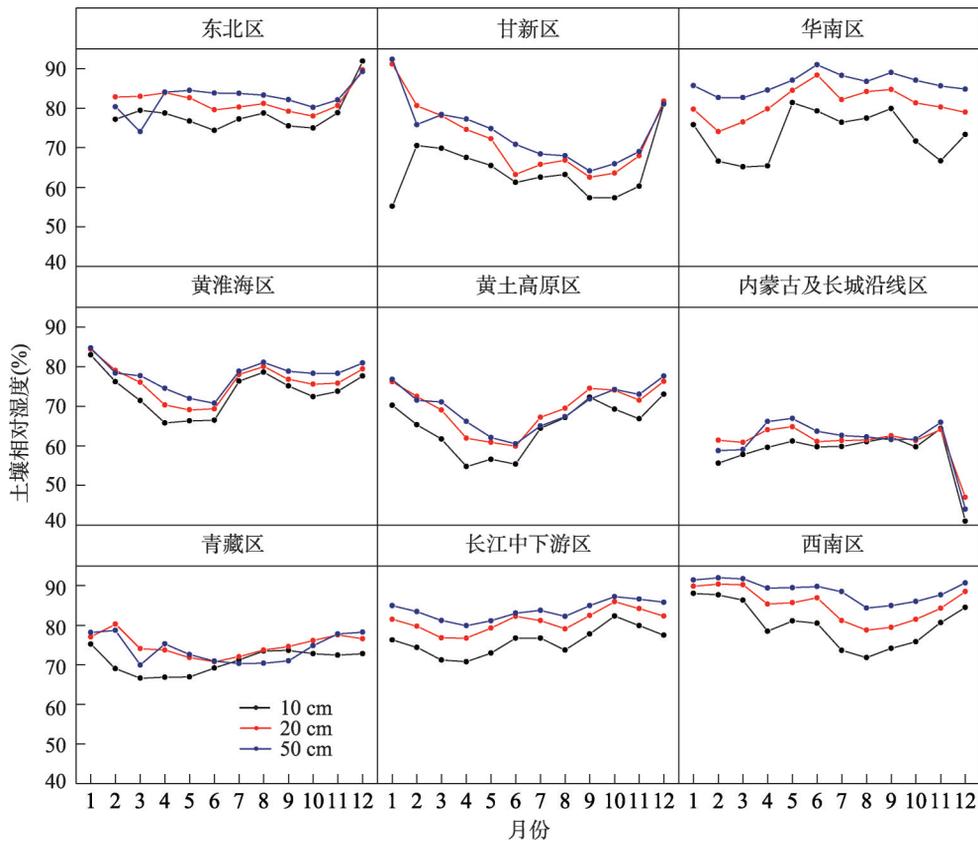


图5 中国不同农业区土壤相对湿度的逐月变化

Fig. 5 Monthly variation of relative soil moisture in different agricultural regions of China

全国耕地土壤相对湿度与潜在蒸发量在各季节普遍呈现负相关关系(图6)。春季,耕地土壤相对湿度与潜在蒸发量呈负相关关系,其中在东北区东部、黄淮海区大部、长江中下游区大部、华南区东部、西南区东部,黄土高原区以及青藏区与甘新区交界处土壤相对湿度与潜在蒸发量的负相关性较强。夏季,在甘新区的塔里木盆地东缘、长江中下游区南部土壤相对湿度与潜在蒸发量呈正相关关系,在西南区、内蒙古及长城沿线区、东北区、黄土高原区土壤相对湿度与潜在蒸发量呈负相关的区域明显扩大,而在长江中下游区、甘新区、青藏区、黄淮海区、华南区呈现出明显缩小的趋势。秋季,全国耕地土壤相对湿度与潜在蒸发量普遍存在较强的负相关关系。其中,负相关性在 $-0.3\sim 0$ 的耕地主要分布在甘新区大部、青藏区南部、华南区东部和长江中下游中部等地。冬季,在甘新区西部、内蒙古及长城沿线区东南部土壤相对湿度与潜在蒸发量呈正相关的区域广泛分布。

耕地土壤相对湿度与气温相关系数的空间分布季节变化较大(图6)。春季,土壤相对湿度与气温普遍呈负相关关系,其中负相关性较强的耕地主要分布在东北区大部、黄淮海区西南部、长江中下游区北部、西南区大部、华南区东部。此外,西南区东南部、长江中下游区南部与华南区东部广泛分布着土壤相对湿度值与气温呈正相关性的耕地,其中珠江口的正相关性较强。西南区的东北部、黄土高原区西南部、青藏区的东北部、甘新区的河西走廊也广泛分布着土壤相对湿度与气温正相关的耕地,而在黄淮海区东

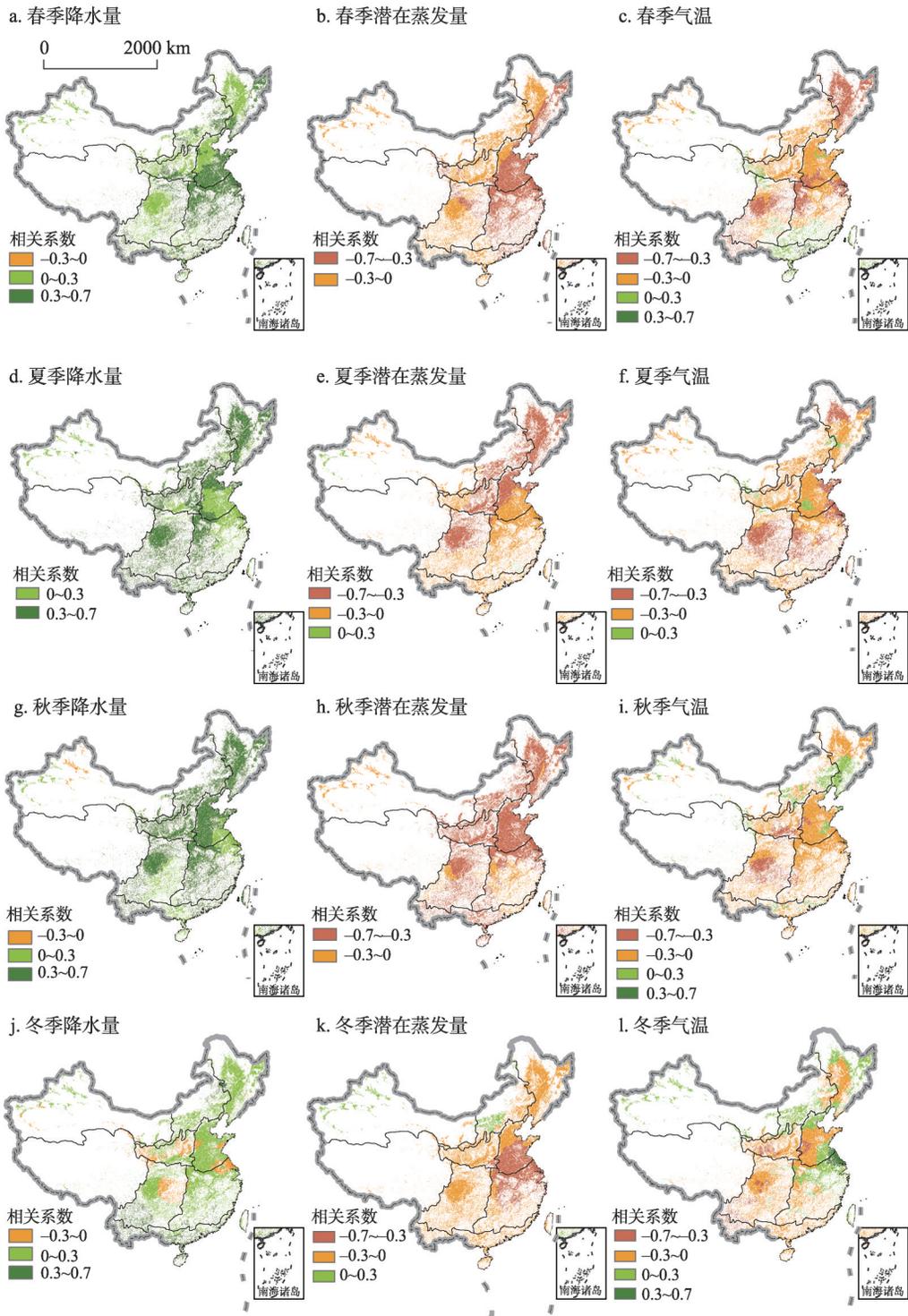


图6 中国主要气象要素与土壤相对湿度相关系数的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of correlation coefficients between main meteorological factors and relative soil moisture

部、甘新区西部也有零星分布。夏季, 土壤相对湿度与气温呈正相关的区域普遍缩小, 但在东北区与内蒙古及长城沿线区交界处以及黄淮海区呈扩大趋势。秋季, 东北区南部、青藏区大部、甘新区大部、黄土高原区西部、内蒙古及长城沿线区大部、黄淮海区东南部的土壤相对湿度与气温呈正相关关系, 其中在华南区呈零星分布。西南区中部、长江中下游区西南部、黄淮海区中部、黄土高原区南部耕地土壤相对湿度与气温负相关性较强。冬季, 在甘新区大部、内蒙古及长城沿线区大部、东北区东部、长江中下游区北部、黄淮海区东南部和北部的耕地土壤相对湿度与气温呈正相关关系。在黄土高原区南部、黄淮海区西部、华南区西部、西南区西南部等耕地土壤相对湿度与气温的负相关性较强。

4.2 水田、旱地土壤相对湿度的差异

水田大多位于降水量充足的季风区, 灌溉水源充足, 各土层土壤相对湿度年均值整体高于旱地(图7)。全国85%以上的水田, 其20 cm、50 cm深度的土壤相对湿度值超过80%, 而10 cm深度的土壤相对湿度值多为60%~80%之间。全国50%以上的旱地, 其10 cm、20 cm深度的土壤相对湿度值在60%~80%之间, 而50 cm深度的土壤相对湿度值多集中在60%~80%之间(图2)。

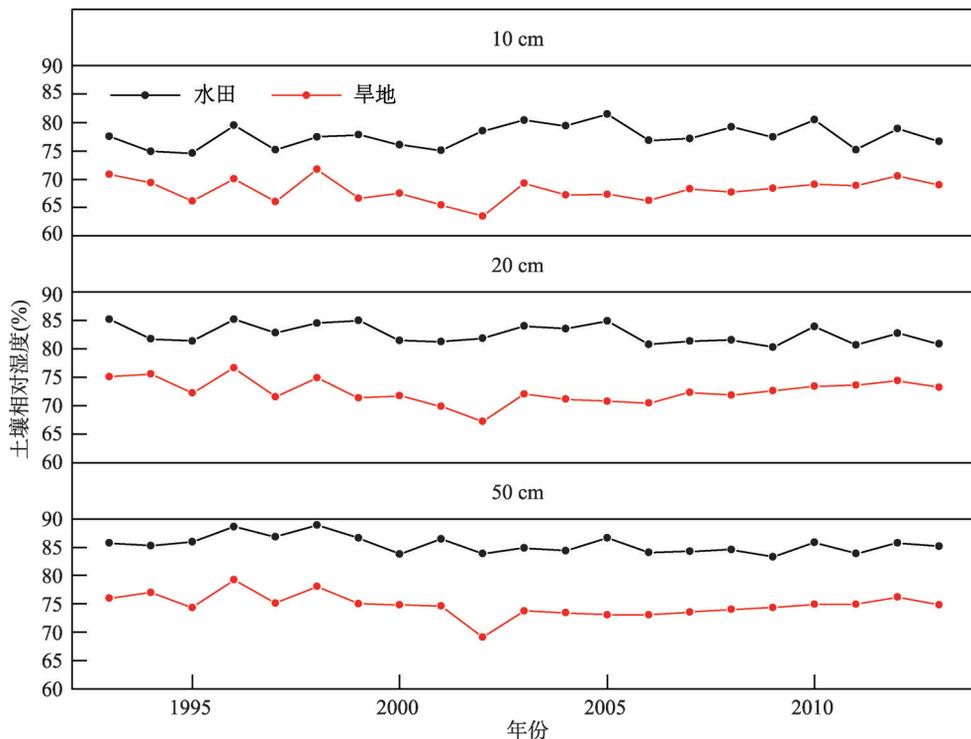


图7 不同耕地类型土壤相对湿度年际变化状况

Fig. 7 Interannual variation of relative soil moisture in different types of farmland

夏季, 旱地土壤相对湿度与降水量和潜在蒸发量的相关程度均强于水田, 水田与气温的相关程度强于旱地。秋季, 旱地与降水量和潜在蒸发量的相关程度均强于水田, 水田与气温的相关程度强于旱地。冬季, 水田和旱地与降水量的相关程度较为接近, 水田与潜在蒸发量的相关程度强于旱地, 旱地与气温的相关程度强于水田。可见, 夏、秋两季时位于北方农业区的旱地土壤相对湿度受降水量和蒸发量的影响更大, 冬季由于北方

旱地大多形成季节性冻土层,气象因素对土壤相对湿度的影响减弱,而位于西南、长江中下游、华南农业区的土壤相对湿度受气象因素影响仍较大。

5 结论

(1) 自1993年以来中国耕地的土壤相对湿度数值整体呈波动增长的趋势。

(2) 全国耕地的土壤相对湿度普遍大于60%,分布区域自4月中旬开始随夏季风推移不断向北向西扩大,自10月下旬开始向东、南方向缩小。土壤相对湿度值随土壤深度的增加而增加,高值区的耕地分布范围也随土壤深度的增加而扩大。

(3) 全国耕地的年际倾向率普遍在 $-2.9\%/a \sim 5\%/a$,呈现正值与负值区域交错分布,正值区域随着土层深度增加而扩大的规律。各土层土壤相对湿度的年际变化与年内变化的趋势均呈波动上升趋势,在夏秋季上升速度最快,变化幅度均随土层深度增加而减小。

(4) 土壤相对湿度与降水量普遍存在较强的正相关关系,与潜在蒸发量、气温普遍呈较强的负相关关系。

(5) 水田的土壤相对湿度年均值整体高于旱地,两种耕地类型土壤相对湿度年均值的差距随土层深度增加而增大。春、夏、秋季气象因素对旱地土壤相对湿度影响较大,冬季气象因素对水田影响更大。

参考文献(References)

- [1] Zhu Hejian, Chen Jianfei, Chen Songlin, et al. Soil Geography. Beijing: Higher Education Press, 2010. [朱鹤健, 陈健飞, 陈松林, 等. 土壤地理学. 北京: 高等教育出版社, 2010.]
- [2] Zhu G F, Shi P J, Pu T, et al. Changes of surface soil relative moisture content in Hengduan Mountains, China, during 1992-2010. Quaternary International, 2013, 298(7): 161-170.
- [3] Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin, et al. Relationship between regional soil moisture variation and climatic variability over east China. Acta Meteorologica Sinica, 2000, 58(3): 278-287. [马柱国, 魏和林, 符淙斌. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系. 气象学报, 2000, 58(3): 278-287.]
- [4] Zhang Lei, Lyu Houquan, Wang Liangyu, et al. Spatial-temporal characteristics of soil moisture in China. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(9): 1494-1508. [张蕾, 吕厚荃, 王良宇, 等. 中国土壤湿度的时空变化特征. 地理学报, 2016, 71(9): 1494-1508.]
- [5] Delworth T L, Manabe S. The influence of potential evaporation on the variabilities of simulated soil wetness and climate. Journal of Climate, 1988, 1(5): 523-547.
- [6] Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin, et al. Progress in the research on the relationship between soil moisture and climate change. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(3): 88-94. [马柱国, 魏和林, 符淙斌. 土壤湿度与气候变化关系的研究进展与展望. 地球科学进展, 1999, 14(3): 88-94.]
- [7] Delworth T L, Manabe S, Stouffer R J. Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled ocean-atmosphere model. Journal of Climate, 1993, 6(11): 1993-2011.
- [8] Wang Suping, Zhang Cunjie, Song Lianchun, et al. Relationship between soil relative humidity and the multiscale meteorological drought indexes. Journal of Glaciology & Geocryology, 2013, 35(4): 865-873. [王素萍, 张存杰, 宋连春, 等. 多尺度气象干旱与土壤相对湿度的关系研究. 冰川冻土, 2013, 35(4): 865-873.]
- [9] Cho E, Choi M. Regional scale spatio-temporal variability of soil moisture and its relationship with meteorological factors over the Korean Peninsula. Journal of Hydrology, 2014, 516(17): 317-329.
- [10] Lu Dengrong, Huang Bin, Wang Jinsong. Change of the ten-day precipitation and its relationship with soil moisture in the rain-fed area east of the Yellow River in Gansu Province. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2): 230-235. [陆登荣, 黄斌, 王劲松. 甘肃河东雨养农业区旬降水变化及其与土壤湿度关系. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 230-235.]
- [11] Wang Fuqiang, Wang Lei, Chen Xi. Analysis of relative soil moisture variation characteristics and influencing factors in Zhengzhou City. Water Saving Irrigation, 2015(2): 8-11. [王富强, 王雷, 陈希. 郑州市土壤相对湿度变化特征及影响

- 因素分析. 节水灌溉, 2015(2): 8-11.]
- [12] Zhou Bin, Li Ji, Lin Junjie, et al. Soil relative moisture characteristics and influencing factors in Liaoning Province in spring. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(6): 1630-1637. [周斌, 李辑, 林俊杰, 等. 辽宁省春季土壤相对湿度特征及影响因素. *生态学杂志*, 2015, 34(6): 1630-1637.]
- [13] Zhang Renhe, Liu Li, Zuo Zhiyan. Variations of soil moisture over China and their influences on Chinese climate. *Chinese Journal of Nature*, 2016, 38(5): 313-319. [张人禾, 刘栗, 左志燕. 中国土壤湿度的变异及其对中国气候的影响. *自然杂志*, 2016, 38(5): 313-319.]
- [14] Zuo Zhiyan, Zhang Renhe. Spatial and temporal variations of spring soil moisture in east China. *Scientific Sinica Terrae*, 2008, 38(11): 1428-1437. [左志燕, 张人禾. 中国东部春季土壤湿度的时空变化特征. *Science China Earth Sciences*, 2008, 38(11): 1428-1437.]
- [15] Zuo Zhiyan, Zhang Renhe. The spring soil moisture and the summer rainfall in eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(14): 1722-1724. [左志燕, 张人禾. 中国东部夏季降水与春季土壤湿度的联系. *科学通报*, 2007, 52(14): 1722-1724.]
- [16] Zhang Xiuzhi, Wu Xunying, He Jinhai. Vertical character of soil moisture in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(1): 51-61. [张秀芝, 吴迅英, 何金海. 中国土壤湿度的垂直变化特征. *气象学报*, 2004, 62(1): 51-61.]
- [17] Fang Wensong, Deng Tianhong, Liu Ronghua, et al. Variation regularities of soil water in vari-type soils in Henan Province. *Meteorological Science and Technology*, 2005, 33(2): 182-184. [方文松, 邓天宏, 刘荣华, 等. 河南省不同土壤类型墒情变化规律. *气象科技*, 2005, 33(2): 182-184.]
- [18] Baroni G, Ortuani B, Facchi A, et al. The role of vegetation and soil properties on the spatio-temporal variability of the surface soil moisture in a maize-cropped field. *Journal of Hydrology*, 2013, 489(3): 148-159.
- [19] Zhang Jingyong, Dong Wenjie, Ye Duzheng, et al. New evidence for effects of land cover in China on summer climate. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(1): 91-95. [张井勇, 董文杰, 叶笃正, 等. 中国植被覆盖对夏季气候影响的新证据. *科学通报*, 2003, 48(1): 91-95.]
- [20] Zhu H D, Shi Z H, Fang N F, et al. Soil moisture response to environmental factors following precipitation events in a small catchment. *Catena*, 2014, 120(3): 73-80.
- [21] Zhang Jie, Zhang Wenyu, Wang Xiaoyan, et al. Changes characteristics of the soil moisture in semi-arid areas. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2012, 48(2): 57-61. [张婕, 张文煜, 王晓妍, 等. 半干旱地区土壤湿度变化特征. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(2): 57-61.]
- [22] Wang Lei, Wen Jun, Wei Zhigang, et al. Soil moisture over the west of Northwest China and its response to climate. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(6): 1257-1266. [王磊, 文军, 韦志刚, 等. 中国西北区西部土壤湿度及其气候响应. *高原气象*, 2008, 27(6): 1257-1266.]
- [23] Zhang Yafeng, Wang Xinping, Pan Yanxia, et al. The dependence of surface albedo on soil moisture in an arid desert area. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(5): 1141-1148. [张亚峰, 王新平, 潘颜霞, 等. 荒漠地区地表反照率与土壤湿度相关性研究. *中国沙漠*, 2011, 31(5): 1141-1148.]
- [24] Zhang Qiang, Wang Sheng. Study on annual water-heat characteristics and annual variation of surface radiation balance in arid desert area. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(2): 211-216. [张强, 王胜. 干旱荒漠区土壤水热特征和地表辐射平衡年变化规律研究. *自然科学进展*, 2007, 17(2): 211-216.]
- [25] Chen Shaoyong, Guo Kaizhong, Dong Anxiang. Research of variety rule of soil humidity in Loess Plateau of China. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(3): 530-537. [陈少勇, 郭凯忠, 董安祥. 黄土高原土壤湿度变化规律研究. *高原气象*, 2008, 27(3): 530-537.]
- [26] Li Runchun, Zhang Xiuzhi, Wang Lihua, et al. Analysis on soil moisture content in the middle reaches of the Yellow River. *Arid Zone Research*, 2011, 28(1): 85-91. [李润春, 张秀芝, 王丽华, 等. 黄河中游地区土壤湿度特征分析. *干旱区研究*, 2011, 28(1): 85-91.]
- [27] Wan Guoning, Yang Meixue, Wang Xuejia, et al. Variations in soil moisture at different time scales of BJ site on the Central Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(2): 286-293. [万国宁, 杨梅学, 王学佳, 等. 青藏高原中部BJ站土壤湿度不同时间尺度的变化. *土壤通报*, 2012, 43(2): 286-293.]
- [28] Zhuo Ga, Chen Tao, Zhou Kanshe, et al. Spatial and temporal distribution of soil moisture over the Tibetan Plateau during 2009-2010. *Journal of Glaciology & Geocryology*, 2015, 37(3): 625-634. [卓嘎, 陈涛, 周刊社, 等. 2009-2010年青藏高原土壤湿度的时空分布特征. *冰川冻土*, 2015, 37(3): 625-634.]
- [29] Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Yu Rucong. Spatial distribution and temporal variation of soil moisture over China (Part I): Multi-data intercomparison. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(3): 581-597. [张文君, 周天军, 宇如

- 聪. 中国土壤湿度的分布与变化(I): 多种资料间的比较. 大气科学, 2008, 32(3): 581-597.]
- [30] Younis S M Z, Iqbal J. Estimation of soil moisture using multispectral and FTIR techniques. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2015, 18(2): 151-161.
- [31] National Agricultural Regionalization Commission. *Comprehensive Agricultural Regionalization of China*. Beijing: China Agriculture Press, 1981. [全国农业区划委员会. 中国综合农业区划. 北京: 农业出版社, 1981.]
- [32] Zhu Guofeng, He Yuanqing, Pu Tao, et al. Spatial distribution and temporal trends in potential evapotranspiration over Hengduan Mountains region from 1960 to 2009. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 905-916. [朱国锋, 何元庆, 蒲焘, 等. 1960-2009年横断山区潜在蒸发量时空变化. 地理学报, 2011, 66(7): 905-916.]
- [33] Allen R G, Pruitt W O, Wright J L, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo, by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, 2006, 81(1): 1-22.
- [34] Yamamoto J K. On unbiased backtransform of lognormal kriging estimates. *Computational Geosciences*, 2007, 11(3): 219-234.
- [35] Zhu Guofeng, Qin Dahe, Tong Huali, et al. Variation of thornthwaite moisture index in Hengduan Mountains, China. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(5): 687-702.

Spatial and temporal variations of relative soil moisture in China's farmland

PAN Hanxiong¹, ZHU Guofeng^{1,2,3}, ZHANG Yu¹, GUO Huiwen¹, YONG Leilei¹,
WAN Qiaozhuo¹, MA Huiying¹, LI Sen⁴

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China; 3. Gansu Engineering Research Center of Land Utilization and Comprehension Consolidation, Lanzhou 730070, China; 4. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Based on the data of relative soil moisture obtained from 653 agricultural meteorological stations in China during the period of 1993-2013, the spatial and temporal differentiations of relative soil moisture in China's farmland were analyzed and discussed by using geostatistical methods. The results show that the relative soil moisture of China's farmland has fluctuated and increased since 1993, exceeding 60% in general. The distribution area has been expanding to the north and west with the summer monsoon since mid-April, and in late October, the region began to shrink to the east and south. The value of relative soil moisture increases with the increase of soil depth, and the distribution of farmland in high-value area increases with the increase of soil depth. The relative soil moisture of farmland increases fastest in summer and autumn, and the range of change decreases with the increase of soil depth. There is a strong positive correlation between relative soil moisture and precipitation. Relative soil moisture has a strong negative correlation with potential evaporation and temperature. The annual mean value of relative soil moisture in paddy field is higher than that in dry land, and the difference between the annual mean values of relative soil moisture of two types of farmland increases with the increase of soil depth.

Keywords: relative soil moisture; farmland; Kriging interpolation; correlation analysis; spatial and temporal variation