

黄河沿岸陕豫区土壤水分的空间变化特征 及其驱动力因子分析

刘苏峡^{1,2} 毛留喜² 莫兴国³ 赵卫民⁴ 林忠辉³

1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

2 中国气象局国家气象中心, 北京 100081

3 中国科学院地理科学与资源研究所生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

4 黄河水利委员会水文局, 郑州 450004

摘要 基于黄河沿岸陕西和河南境内的 33 个农业气象站从 1992~2005 年的实测土壤水分资料, 计算了各站表层 10、20 和 50 cm 各土层的多年平均植被可利用土壤水分储量, 发现土壤水分储量存在明显的空间变异性。多年平均土壤水分储量呈现西北(陕北)低以及南、东南和东部(陕南和河南)高的变化态势。其中, 在陕西绥德站出现水分的最低值, 与黄土高原属于水分贫瘠区相对应。在河南信阳站出现水分最高值, 与河南南部和陕南水分比较充沛相对应。土壤水分储量垂向分异不明显, 各土层的土壤水分储量之间存在较好的相关性。通过简单线性相关分析发现, 土壤水分储量与田间持水量呈现较强的正相关, 与纬度呈较强的负相关。而与土壤容重、地理位置、气象要素等其他因子相关关系不显著。灌溉与土壤水分储量的相关系数比降水与土壤水分储量的相关系数大, 说明该区灌溉是土壤水分的重要调节因子。通过主成分分析发现, 对大多数站点而言, 土壤水分变化受下垫面、气候和灌溉等的综合影响, 其影响程度存在明显的空间分异性。

关键词 土壤水分 空间变化 驱动力 主成分分析 黄河沿岸

文章编号 1006-9585 (2008) 05-0645-13 **中图分类号** S152.7 **文献标识码** A

Analysis of Spatial Variability of Soil Moisture and its Driving Force Factors in the Shaanxi-Henan Region along the Yellow River

LIU Su-Xia^{1,2}, MAO Liu-Xi², MO Xing-Guo³, ZHAO Wei-Min⁴, and LIN Zhong-Hui³

1 *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*

2 *National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

3 *Key Laboratory of Ecological Network Observation and Modeling, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*

4 *Bureau of Hydrology, Yellow River Conservancy Committee, Zhengzhou 450004*

Abstract Based on the observed soil moisture data at 33 agro-meteorological stations in the Shaanxi-Henan region along the Yellow River from 1992 to 2005, the vegetation available soil moisture in the unit of depth at 10, 20 and 50 cm soil layer is calculated. It is found that soil moisture shows strong spatial variability with the values increasing

收稿日期 2007-03-06 收到, 2008-07-20 收到修定稿

资助项目 国家气象局气候变化专项项目 CCSF2006-30、国家自然科学基金资助项目 40671033 和 40671032、国家高技术研究发展计划课题 2006AA10Z228 和中国科学院地理科学与资源研究所创新三期领域前沿课题

作者简介 刘苏峡, 女, 1965 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事流域水文模拟、界面水文过程、土壤水分和生态需水量的研究。
E-mail: liusx@igsrr.ac.cn

from northwest, Shaanxi to south, east and southeast, Henan. Soil moisture is low in the loess plateau, with the minimum value at Suide station, Shaanxi Province. Soil moisture is rich in the south of Shaanxi and Henan, with the maximum at Xinyang station, Henan Province. The vertical variation of soil moisture is not obvious. By using linear correlation analysis between the soil moisture and the influential factors, it is found that there is an obvious positive correlation between soil moisture and field capacity and negative correlation between soil moisture and latitude. The correlation between soil moisture and irrigation is stronger than the correlation between soil moisture and precipitation. The correlations between soil moisture and density, longitude and elevation above sea level are weak. By using principal component analysis, it is found that the driving force of soil moisture is not just as vegetation, soil or climate factor. It is the combination of such multiple factors to drive the spatial variability of soil moisture. The comprehensive effect of all the influential factors on soil moisture shows obvious spatial variability.

Key words soil moisture, spatial variability, driving forces, principal component analysis, Yellow River

1 引言

土壤水分作为水文循环中的重要分量, 直接联系土壤—植被—大气各个系统, 决定大气降水在下渗和产流之间的分配以及能量在潜热和显热之间的分配。由于下垫面及气候驱动因子的差异, 土壤水分呈现显著的区域空间分异。研究土壤水分的空间变异性, 对理解气候变化的趋势、陆面模式的发展、土壤水分观测站网的设计、土壤水分的遥感反演、水文预报、优化灌溉方案以及提高农业用水效率等具有重要意义。迄今已有不少关于土壤水分空间变化的研究^[1~8]。

土壤水分的空间变化尺度可分为两种^[9]: 在几十米的空间范围内, 土壤水分的变化与地貌、地形、土壤质地、植被等状况有关^[10]; 而叠加在此尺度上延伸到几百公里范围的土壤水分的变化, 则更多反映的是大气驱动过程。Entin 等^[11]研究了美国、前苏联、蒙古和中国的部分实测土壤水分的空间变化规律, 认为大气驱动的土壤水分变化的空间尺度约 500 km。Liu 等^[3]基于中国 102 个站点的土壤水分资料, 亦得出类似结论。目前由于研究涉及的空间尺度较大, 资料相对缺乏, 较难详细解释土壤水分的空间变异的驱动力。

土壤水分跟水分来源(降水和灌溉)有关。黄河作为“母亲河”为沿岸的作物带来了灌溉的方便。已有文献^[12~15]从微观和单点角度, 研究了不同的灌溉方式和不同的灌溉制度下土壤水分的变化。但立足黄河沿岸, 从宏观上揭示降水量和灌溉量对土壤水分变化影响的研究不多。

田间持水量和容重也是土壤水分的重要影响

因子。田间持水量作为土壤中所能保持最大数量的毛管悬着水, 是在不受地下水影响的自然条件下所能保持的土壤水分的最大数量指标。它是确定土壤中植物有效水的上限和灌溉水定额的依据。不同土壤的田间持水量值差异较大, 砂性土最小, 壤土居中。土壤容重是在田间自然状态下, 单位体积内所具有的干土质量(单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。一般随质地结构、松紧度和土壤有机质含量等而发生变化。粘土的实质空隙比大空隙居多的砂土要多, 所以其土壤容重比砂质土壤容重要小。在一般情况下, 土壤容重小, 说明土壤孔隙数量多, 比较疏松, 结构性好, 在这种情况下, 土壤的水分、空气、热量状况比较好。另外, 土壤水分也受其他下垫面特征影响, 跟地形地貌、植被等因素密切相关。由于实测站点土壤物理参数等信息的缺乏, 详细解释土壤水分的空间变异与下垫面特征关系的研究不多。基于上述考虑, 本文搜集了位于陕西和河南的黄河沿岸 33 个农业气象站的实测土壤水分、土壤物理参数、植被、气象、海拔高度、经纬度等资料, 采用相关分析和主成分分析方法, 分析土壤水分空间变化的驱动因子, 揭示区域土壤水分的空间变异规律。

2 研究区域和资料概况

研究区域(见图 1)包括了黄河沿岸的河南和陕西两省($32^{\circ}07'48'' \sim 38^{\circ}13'48''\text{N}$, $107^{\circ}19'48'' \sim 115^{\circ}39'36''\text{E}$), 面积约 $59 \times 10^4 \text{ km}^2$, 海拔西北(陕北)高, 南、东南和东部(陕南和河南)低, 最高为陕西旬邑站(1 277 m), 最低为河南固始站(43 m)。多年平均年总降水量在 370~1 089

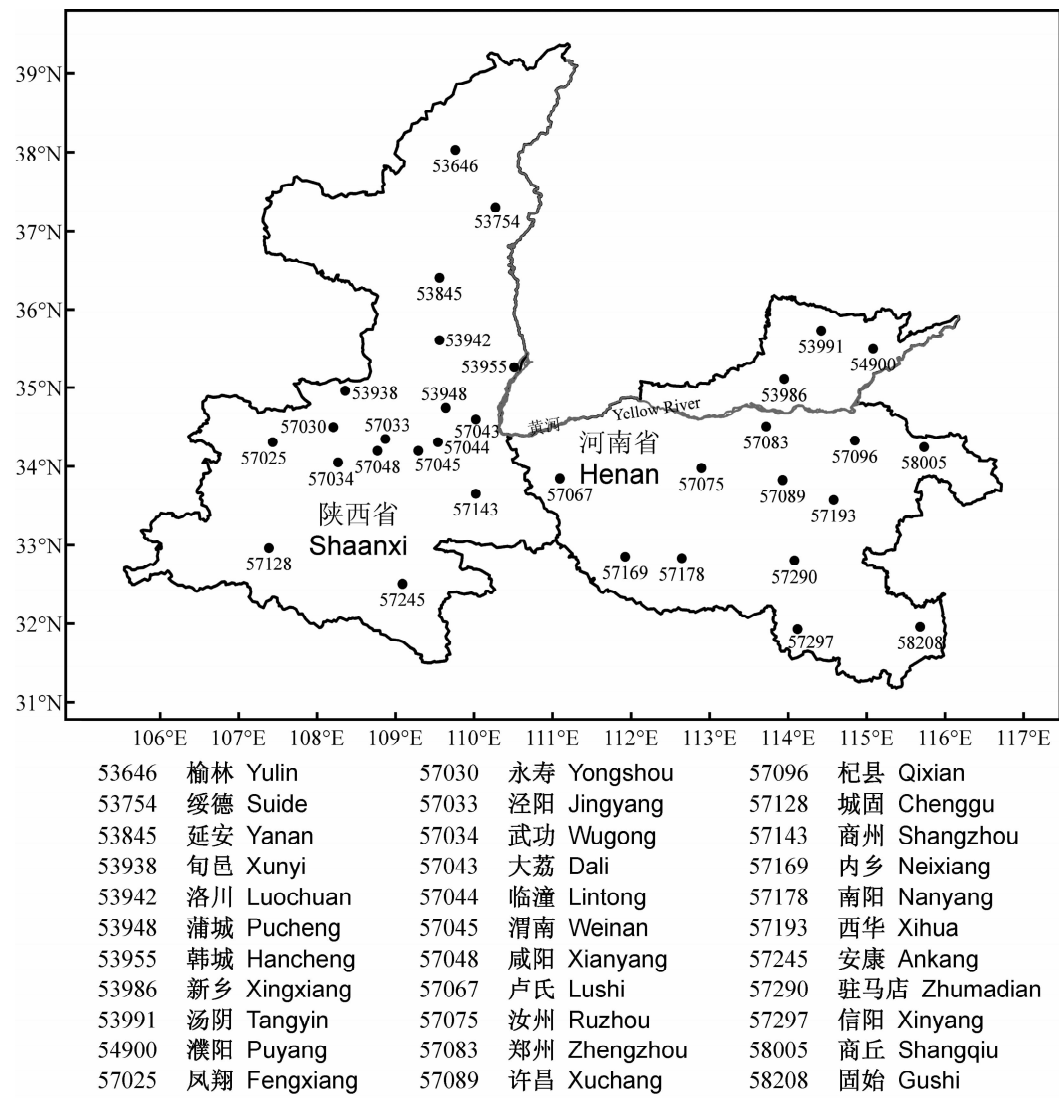


图1 研究区农业气象站点分布（数字为站号）
Fig. 1 Distribution of agro-meteorological stations in the research area (number is station ID)

mm 之间（见图 2）。

研究区植物以冬小麦、夏玉米、单季稻、油菜、棉花和大豆为主。有零星的甘蔗、早稻、晚稻、草、花生、春小麦、烟草、蓖麻、土豆和高粱。大多数站点为冬小麦/夏玉米的耕作方式。南部各站作物多为冬小麦/单季稻和单季稻/油菜/其他作物。最北边的榆林站为春小麦或夏玉米。

区内共有 33 个农业气象站，站点分布见图 1，其中河南和陕西境内站点分别为 15 和 18 个。各站点采用土钻法观测土壤水分。每年每月的 8、18 和 28 日观测一次，观测深度为 10、20、30、40 和 50 cm，有的深至 1 m 土层。共搜集到 1992～2005 年的土壤水分观测数据及各站点相应土层的

田间持水量、凋萎湿度和土壤容重等土壤物理参数以及多年平均气候数据。

3 方法

3.1 土壤水分和灌溉计算方法

采用植被可利用土壤水分或储量（Available soil moisture, $A^{[16]}$ ）来分析土壤水分的变化，设共有 N 层土壤（图 3），第 n ($n=1, 2, \dots, N$) 层的土壤重量百分比含水量 θ_{gn} （单位： $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ）、凋萎含水量 θ_{wn} （单位： $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ）、田间持水量 F_{cn} （单位： $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ）、容重 d_{sn} （单位： $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ）和观测土层厚度 Δz_n （单位：cm）。第 n 层至地表的深

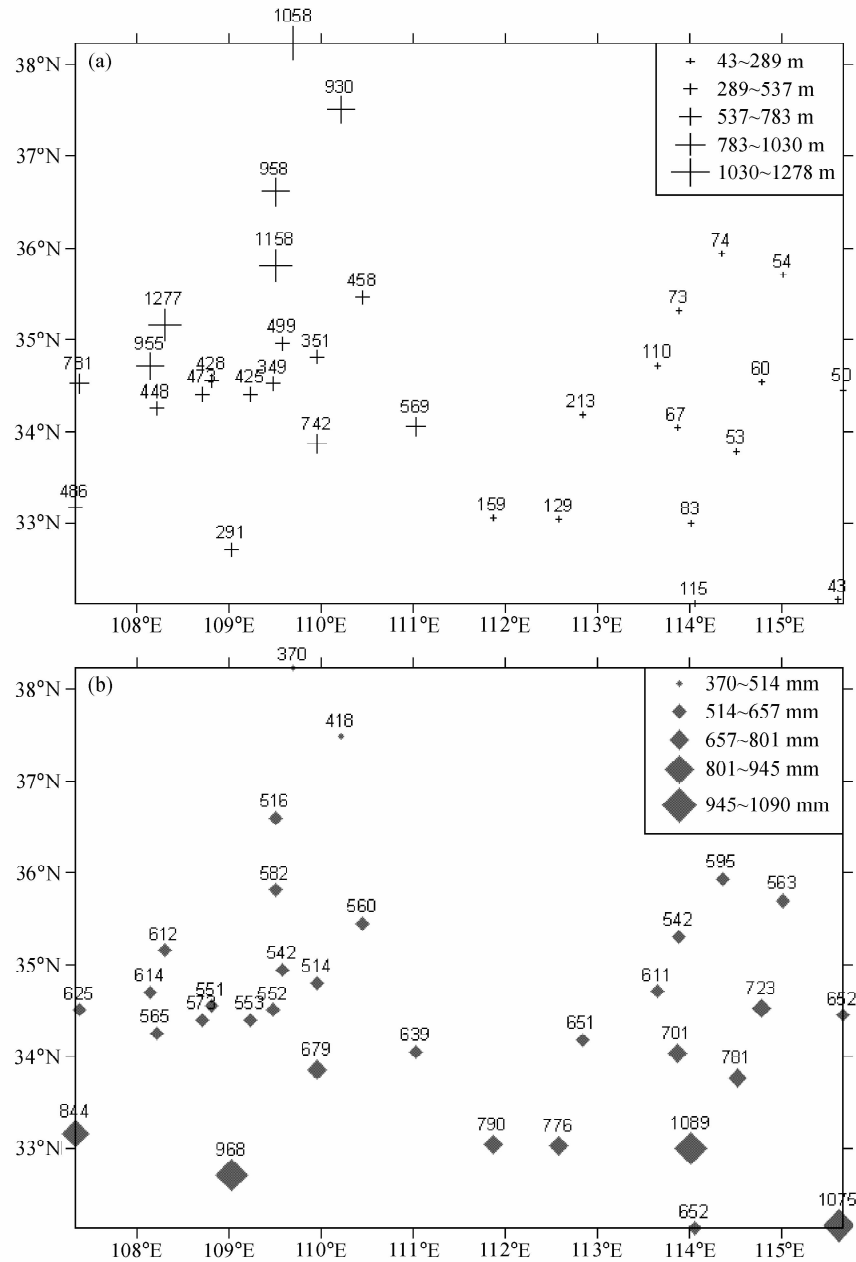


图2 研究区站点的 (a) 海拔高度和 (b) 降水

Fig. 2 (a) Elevation above sea level and (b) precipitation over all 33 stations

度为 D_n (单位: cm)。以水分高度当量 (单位: cm) 计量的深度为 D_N 土层土壤植被可利用土壤水分 $[A(D_N)]$ 表示:

$$A(D_N) = \sum_{n=1}^N (\theta_{gn} - \theta_{wn}) \cdot \Delta z_n \cdot d_{sn}. \quad (1)$$

土壤水分原始资料是土钻法测得的地表以下 10、20 和 50 cm 的重量百分比含水量与田间持水量的比例系数, 运算时用田间持水量进行了换算。共分析 3 个土层 (0~10、0~20 和 0~50 cm) 的

植被可利用土壤水分, 相应地, $D_1 = 10$ cm, $D_2 = 20$ cm, $D_3 = 50$ cm; $\Delta z_1 = 10$ cm, $\Delta z_2 = 10$ cm, $\Delta z_3 = 30$ cm。

计算时假设每个观测土层厚度内部的土壤含水量和土壤物理参数均匀。

凋萎含水量是指不能满足植物需水的要求, 致使植物细胞膨压下降而发生凋萎的土壤水分。凋萎含水量是土壤有效水分的下限, 常用压力膜法和生物法进行测定^[17,18]。土壤质地不同, 凋萎

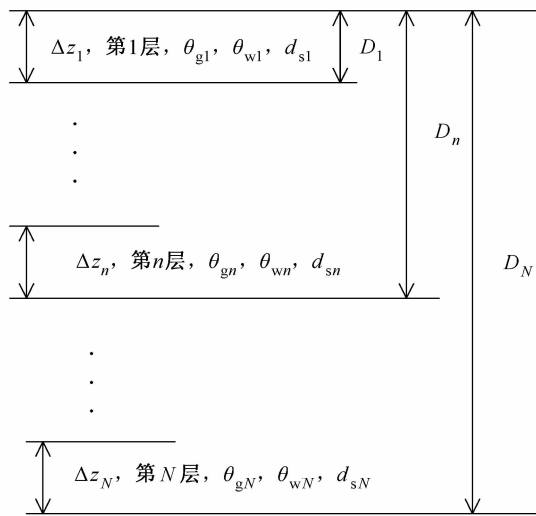


图3 计算土壤水分储量示意图

Fig. 3 The sketch for calculation of available soil moisture

含水量有明显差异,一般随砂粒增加而减小,随粘粒增加而增大。譬如以燕麦为指示物,在土壤质地为粉壤土的四川宜宾,10、20、30、40和50 cm土层的凋萎含水量分别为6.7%、5.4%、5.4%、6.0%和4.8%^[19]。而在山东菏泽的砂性壤土上,选用大麦作为指示作物测定的各层的凋萎湿度为3.6%、3.5%、3.6%、4.5%和2.9%^[20]。

同一类型土壤,不同作物和不同生育期的凋萎含水量不同。例如,同样在山东菏泽的砂性壤土上,选用丝瓜作为指示作物测定的土壤凋萎湿度为4.2%、4.4%、4.5%、5.0%和4.3%,选用玉米作为指示作物测定的土壤凋萎湿度为3.5%、3.8%、3.9%、4.6%和3.1%^[20]。德国的实验结果表明,在砂土、沙壤土和壤土中,向日葵的凋萎含水量分别为1.3%、4.8%和11.3%;燕麦分别为1.1%、5.9%和11.1%;番茄分别为1.1%、6.9%和11.7%^[19]。

本研究区观测点的植被虽然多种多样,但基本上以冬小麦、夏玉米和棉花为主。计算时未对不同的作物分别测定凋萎含水量,而是直接采用了国家气象局提供的每站(以燕麦为指示作物的生物法、压力膜法或其他经验方法测得的)凋萎含水量资料。原则上,土壤水分垂向的空间分异应该采用各层的重量或体积土壤含水量来分析,因为相对于各土层深度, A 表达的是该层土体的

土壤水分总和的概念[见公式(1)]。但本文仍将不同土层深度的 A 进行比较。如果某个观测土层厚度内的土壤含水量呈现特殊的变化,通过连续地比较各土层的 A ,则仍可以期望用不同土层的 A 捕捉到土壤水分的垂向变异。

根据33个站1992~2005年10、20和50 cm土层每旬的 A ,计算各站点各月的多年平均 A ,最后对各月的多年平均 A 再进行平均,得到各站各土层 A 多年平均值,依此进行空间分析和驱动力分析。

研究区的灌溉信息根据区内站点的代表植被分布状况及其灌溉定额来确定。灌溉定额由中国水利百科全书^[21]查得。

3.2 驱动力分析

首先采用最简单的线性相关,研究土壤水分与影响因素的关系,计算土壤水分与其影响因素的相关系数,根据相关系数的大小初步判断相关关系的紧密程度。然后采用主成分分析方法,进一步寻找土壤水分空间变异的主要影响因子。

主成分分析法于20世纪初被提出^[22,23],至今仍被广泛应用。其中心思想是从若干项指标中找出少数几个综合指标,使它们尽可能多地反映指标的信息,而且彼此之间不相关。

设 $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_J)$ 是由 I 个站点土壤水分的 J 个影响因子组成的 J 维随机向量。 $\mathbf{E}(\mathbf{X})=\mathbf{u}$,协方差 $\mathbf{D}(\mathbf{X})=\mathbf{V}$ 。 $\mathbf{V}$ 的 J 个特征值为 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_J$,对应的特征向量为 $u_1, u_2, \dots, u_J$,它们标准正交。则主成分可表示为

$$z_k = \sum_{j=1}^J u_j x_j, \quad (2)$$

变量 $z_1, z_2, \dots, z_K$ 均是 $x_1, x_2, \dots, x_J$ 的线性组合, $K \leq J$ 。其构成的坐标系是原坐标系的平移和正交旋转,在 $z_1, z_2, \dots, z_K$ 组成的 K 维空间中,第1主成分 z_1 对应于数据变异最大的方向,对于 $z_2, z_3, \dots, z_K$,依次有 $\mathbf{V}(z_2) \geq \mathbf{V}(z_3) \geq \dots \geq \mathbf{V}(z_K)$,因此, z_1 是携带原数据信息最多的一维变量。如果主成分 z_1 不足以代表原 J 个变量所包含的信息,就考虑采用 z_2 ,得到第2主成分。类似可得第3主成分,第4主成分等。依此类推,至 K 维空间,基本上保留了原始数据的所有信息。究竟取多少个主成分,通常由累计贡献率

$$E_m = \sum_{k=1}^m \lambda_k / \sum_{k=1}^K \lambda_k$$

来判断。本文以 $E_m > 80\%$ 为准则确定主成分个数, 认为相应的 m 个主成分基本上代表了原 J 个变量的信息。

总体协方差 $\mathbf{V}$ 用 J 项指标的 I 个样本的样本协方差来近似代替。

在进行主成分分析之前, 需要事先对变量 $\mathbf{X}$ 进行标准化, 以克服量纲各异给分析带来的影响。采用下式进行标准化, 使其均值为 0, 方差为 1:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j}, \quad i=1, 2, \dots, I; \quad j=1, 2, \dots, J \quad (3)$$

$\bar{x}_j, \sigma_j$ 为第 j 个指标的样本均值和样本均方差。则 $\mathbf{V}$ 可用数据表 $(y_{ij})_{I \times J}$ 的相关矩阵 $\mathbf{X}$ 来代替。

最后根据 m 个主成分的权重

$$w_k = \lambda_k / \sum_{j=1}^J \lambda_j, \quad k=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

确定综合评价函数 z^* :

$$z^* = \sum_{k=1}^m w_k z_k. \quad (5)$$

用式 (5) 计算各站点的综合评分, 根据 z^* 的大小, 就可以分析各个站点环境因子对土壤水分总的影响, 依此研究土壤水分空间变异的驱动力。

在进行主成分分析之前, 还需要根据变量间的相关系数判断主成分分析是否必要。当相关系

数矩阵为单位矩阵时, 变量间相互独立, 不需要进行主成分分析。如果变量间相互不独立, 可进一步做主成分分析, 以遴选主要影响变量。具体采用巴氏 (Bartlett) 球形检验来判断。设总体包含 J 个彼此不相关的变量, 每个变量有 I 个取值, 总体相关矩阵 $\mathbf{R}_J$ 是一单位阵。假设

$$H0: |\mathbf{R}_J| = 1 \quad (\text{单位阵的行列式} = 1),$$

$$H1: |\mathbf{R}_J| \neq 1,$$

巴氏球形检验的统计量为

$$\chi^2 = -\left[I - 1 - \frac{1}{6}(2J+5)\right] \ln |\mathbf{R}|. \quad (6)$$

通过样本资料计算统计量, 选定显著性水平 $\alpha = 0.05$, 在自由度 $J(J-1)/2$ 下查统计表的 χ^2 。若计算的 χ^2 小于查表所得的 χ^2 , 则该组资料元素为不相关, 没有必要进行主成分分析。反之, 则进一步做主成分分析, 遴选主要影响变量。若相关系数非常高, 譬如大于 0.9, 有研究认为也不必进行主成分分析, 直接用无量纲化以后的指标间的算术平均值来评分^[24]。

4 结果与分析

4.1 土壤水分储量和物理参数与灌溉量的空间变化特征

图 4 为多年平均 10 cm 土层 A 的空间分布。

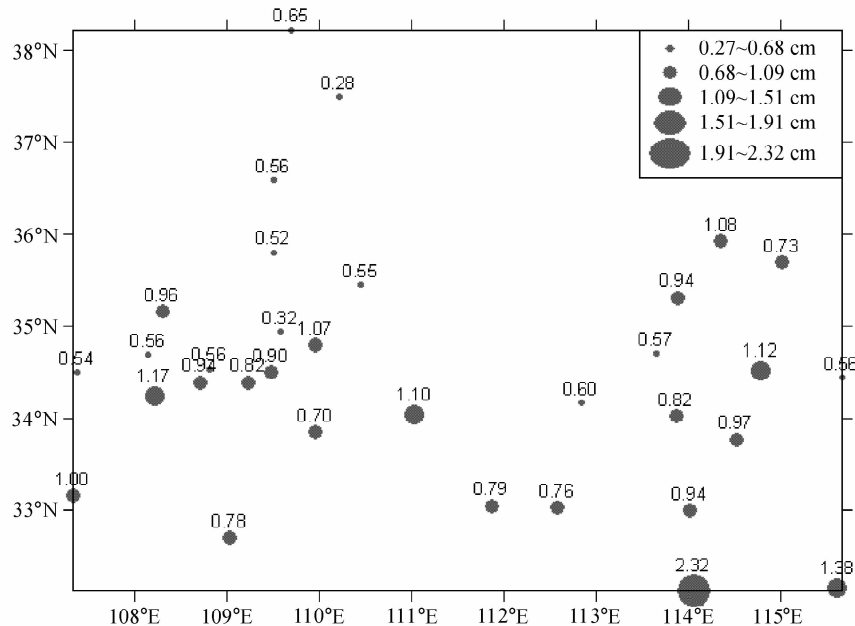


图 4 各站点 10 cm 土层水分储量 (A) 的空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of A at 10 cm soil layer

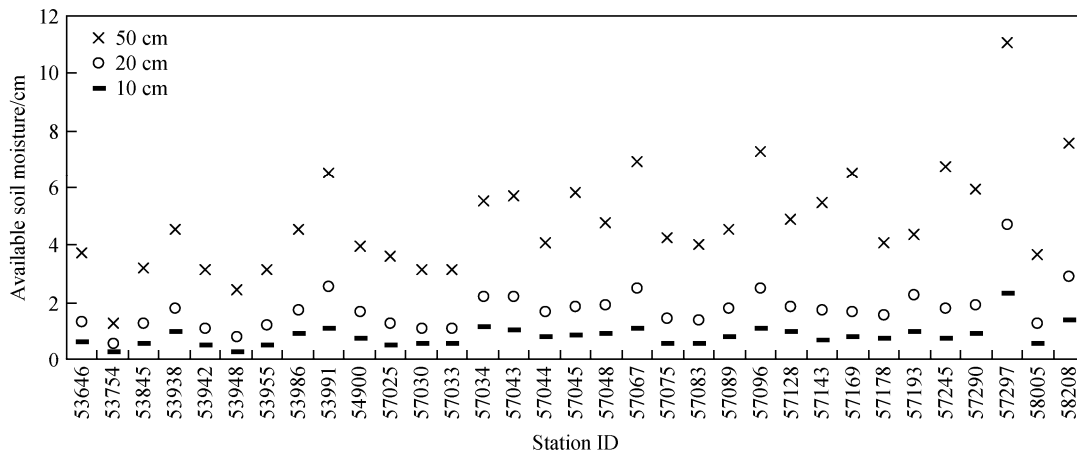


图5 各站点 10、20 和 50 cm 土层水分储量 (A) 的比较

Fig. 5 The comparison of A at 10, 20 and 50 cm soil layer

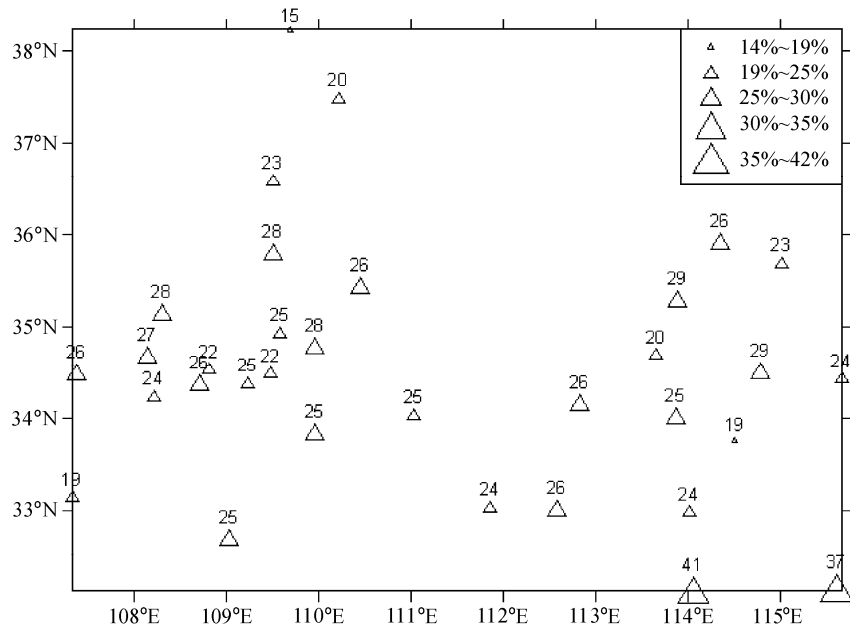


图6 各站点 10 cm 土层田间持水量 (F_c) 的空间分布

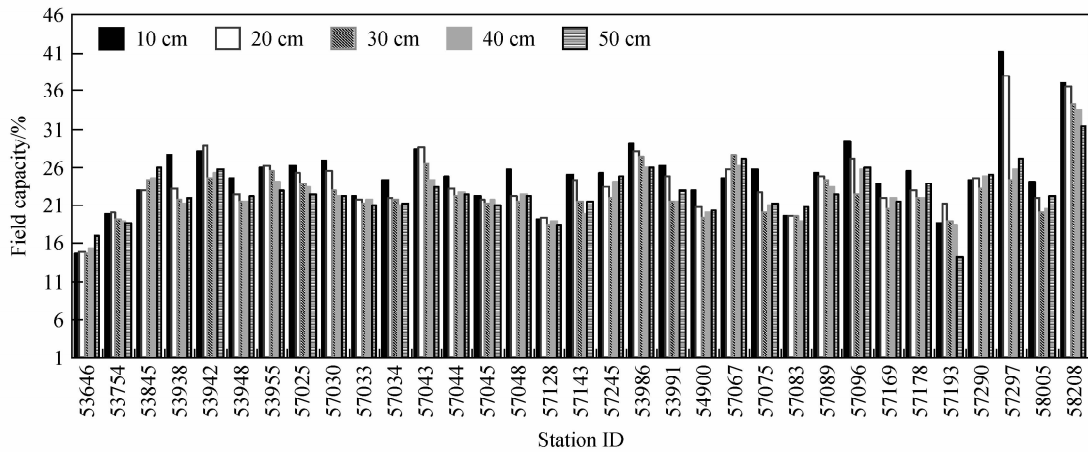
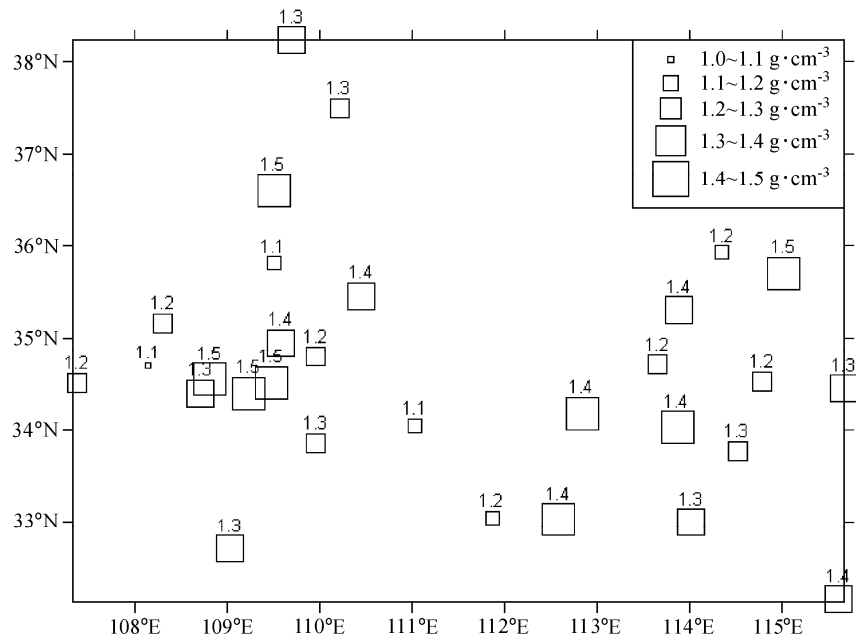
Fig. 6 The spatial distribution of F_c at 10 cm soil layer

可以看出全年平均状态下, A 呈现西北 (陕北) 低以及南、东南和东部 (陕南和河南) 高的变化趋势。黄土高原属于水分贫瘠区, 在陕西绥德站出现一个面上水分分布的最低值。河南南部和陕南土壤水分比较充沛, 最高值出现在河南信阳站。海拔较低站点的 A 值比海拔较高站点的高。10、20 和 50 cm 土层的 A 的空间分布基本一致 (见图5)。

田间持水量变化范围为 14%~41%。从各点 10 cm 土层平均土壤田间持水量的分布状况来看

(图6), 高值区在东南角的河南信阳站, 低值区在黄土高原。从垂直分布看 (图7), 大部分站点呈现出表层数值较高、深层较低的特点, 反映了农田耕层蓄水量高, 深层蓄水能力逐渐减弱的规律。在整个研究区, 陕西榆林站的田间持水量最低, 且各层次的值都低。河南的固始站最高, 信阳站虽然表层的田间持水量非常高, 但深层的较低。

土壤容重的分布趋势比较复杂 (图8), 没有前述的海拔高度和田间持水量那样的西北—东南相异的分布形式。但总体上, 高值仍分布在河南,

图7 各站点 10、20、30、40 和 50 cm 土层田间持水量 (F_c) 的比较Fig. 7 The vertical distribution of F_c at 10, 20, 30, 40 and 50 cm soil layer图8 各站点 10 cm 土层土壤容重 (d_s) 的空间分布Fig. 8 The same as Fig. 6, but for d_s

低值分布在陕西。与赵秀兰^[25]研究的土壤容重分布规律一致,即河流、湖滩和平原地带土壤容重值高,山地土壤容重值低。研究区的土壤容重基本在土壤耕层容重之间 ($1.20 \sim 1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。土壤松紧程度比较适宜^[26]。土壤容重的垂直变化呈现表层数值低(疏松),越往深层数值越高(密实)的自然趋势(图9)。除少数几个站点外(如汤阴站),陕西的土壤容重的垂直差异比河南的小。表层 10 cm 与深层的土壤容重垂直差异最大。河南 10 cm 土层的土壤容重比深层显著偏小。在

少数站点,研究区出现 20 cm 土层的土壤容重比表层还低的特殊现象。

根据植被和灌溉定额,估算出研究区的灌溉量分布如图 10。固始、信阳和城固站种植单季稻,所以其灌溉量在全区居高位。比较全区的降水(图 2b)、土壤水分(图 4)与灌溉的分布,在一定程度上彼此呈现出一致的变化态势,即西北低东南高。

4.2 土壤水分变化与环境因子的相关关系

选取如下土壤水分影响因子: 10、20、30、

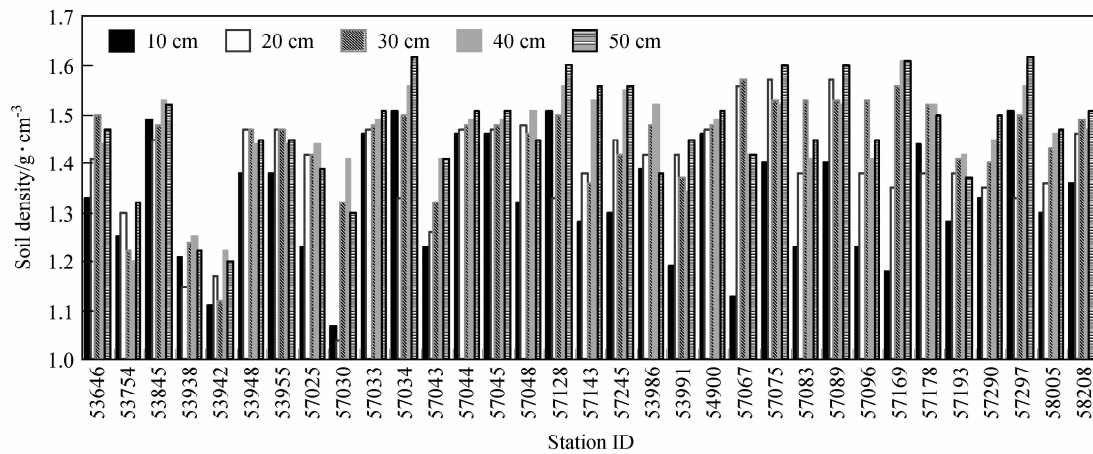


图 9 各站点土壤容重 (d_s) 的垂直分布

Fig. 9 The same as Fig. 7, but for d_s

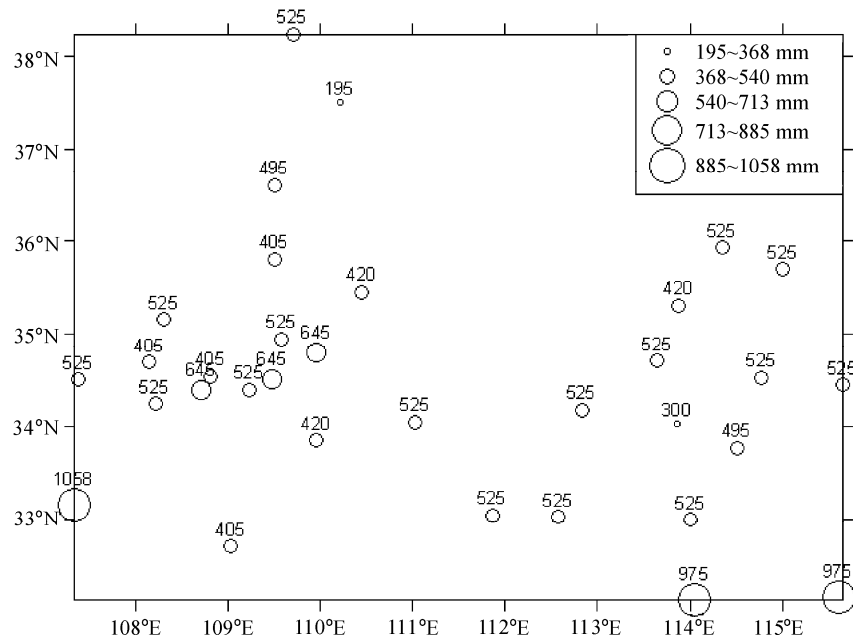


图 10 研究区灌溉量的空间分布

Fig. 10 The spatial distribution of irrigation

40 和 50 cm 土层垂向平均田间持水量及土壤容重 (分别用 F_{c10} 、 F_{c20} 、 F_{c30} 、 F_{c40} 和 F_{c50} 及 d_{s10} 、 d_{s20} 、 d_{s30} 、 d_{s40} 和 d_{s50} 表示)、经度 L_o 、纬度 L_a 、海拔高度 H 、灌溉 I_r 、降雨 P 、日照时数 S_d 和气温 T 。根据研究区 33 个站的数据, 计算 0~10、0~20 和 0~50 cm 土层的植被可利用土壤水分 A_{10} 、 A_{20} 、 A_{50} 与上述影响因子的相关系数 (表 1) 发现, 土壤水分与田间持水量和灌溉呈较明显的正相关关系, 与纬度呈较明显的负相关, 与其他因子的相关关系不明显。A 与海拔高度的负相关性

较弱, 且随着所计算的土层厚度增加而增加。A 与表层田间持水量的关系均较深层关系密切。A 与土壤容重的关系较与田间持水量的关系弱。A 与深层土壤容重的关系较表层关系密切。总体看来, 土壤水分与影响因子的线性相关关系不强。

灌溉与 A 的相关系数比降水与 A 的相关系数大。从此意义上讲, 该区土壤水分变化较多地依赖于灌溉。值得说明的是, 在分析灌溉与土壤水分的关系时, 有如下基本假设: 1) 假设研究区均灌溉, 因为处于黄河沿岸, 具有便利的灌溉条件。

2) 假设灌溉是充分灌溉, 即灌溉量大, 土壤水分大。而不是按需灌溉, 即根据土壤水分状况决定实际灌溉量。依此通过比较土壤水分与降水和灌溉的相关关系, 初步确定灌溉和降水对土壤水分的不同作用。尚未收集到每个站点各年的灌溉量系列数据。文中的灌溉分析数据是根据区内站点的代表植被分布状况及其灌溉定额来确定的, 与实际可能有一定的误差。灌溉和降水对研究区的相对贡献需要更多验证。

表 1 土壤水分与各影响因素的简单线性相关系数 (r_1)

Table 1 The Pearson correlation coefficients (r_1) between A and the influential factors

	A_{10}	A_{20}	A_{50}
F_{c10}	0.65	0.64	0.62
F_{c20}	0.65	0.65	0.61
F_{c30}	0.36	0.36	0.35
F_{c40}	0.43	0.43	0.47
F_{c50}	0.40	0.40	0.49
d_{s10}	0.23	0.17	0.06
d_{s20}	-0.01	0.06	0.09
d_{s30}	0.25	0.27	0.32
d_{s40}	0.29	0.28	0.37
d_{s50}	0.32	0.33	0.43
L_o	0.31	0.39	0.35
L_a	-0.53	-0.54	-0.63
H	-0.38	-0.43	-0.45
I_r	0.67	0.64	0.59
P	0.31	0.33	0.47
S_d	-0.24	-0.23	-0.34
T	0.29	0.33	0.37

表 2 土壤水分影响因素之间的相关系数 (r_2)

Table 2 The Pearson correlation coefficients (r_2) between each pair of the influential factors of A

	F_{c10}	F_{c20}	F_{c30}	F_{c40}	F_{c50}	d_{s10}	d_{s20}	d_{s30}	d_{s40}	d_{s50}	L_o	L_a	H	I_r	P	S_d	T
F_{c10}	1.00																
F_{c20}	0.91	1.00															
F_{c30}	0.74	0.88	1.00														
F_{c40}	0.79	0.87	0.91	1.00													
F_{c50}	0.79	0.79	0.79	0.89	1.00												
d_{s10}	-0.19	-0.26	-0.15	-0.08	-0.16	1.00											
d_{s20}	-0.14	-0.16	-0.01	0.06	-0.03	0.61	1.00										
d_{s30}	-0.11	-0.20	-0.06	0.02	0.02	0.54	0.69	1.00									
d_{s40}	0.02	-0.09	-0.02	0.06	0.03	0.55	0.48	0.78	1.00								
d_{s50}	-0.13	-0.22	-0.19	-0.10	-0.10	0.63	0.63	0.75	0.83	1.00							
L_o	0.12	0.11	0.00	0.05	0.18	-0.05	0.15	0.25	0.05	0.20	1.00						
L_a	-0.32	-0.23	-0.21	-0.33	-0.34	-0.15	-0.14	-0.45	-0.66	-0.52	-0.09	1.00					
H	-0.04	0.00	0.01	-0.09	-0.12	-0.35	-0.47	-0.65	-0.53	-0.61	-0.75	0.43	1.00				
I_r	0.26	0.18	0.12	0.20	0.21	0.18	0.06	0.28	0.30	0.22	0.02	-0.41	-0.23	1.00			
P	0.29	0.28	0.22	0.38	0.43	-0.14	-0.03	0.17	0.32	0.29	0.35	-0.77	-0.39	0.23	1.00		
S_d	-0.13	-0.04	-0.06	-0.16	-0.15	-0.13	-0.12	-0.36	-0.58	-0.44	0.28	0.76	0.12	-0.28	-0.52	1.00	
T	0.08	0.08	0.12	0.17	0.22	0.44	0.46	0.70	0.63	0.69	0.52	-0.53	-0.82	0.23	0.41	-0.29	1.00

4.3 土壤水分变化驱动力因子的主成分分析

由土壤水分各影响因子间的相关系数 (表 2) 可知, 有些影响因子之间存在一定的相关关系。经过显著性水平为 0.05 的巴氏球形检验, 计算的 χ^2 大于查表所得的 χ^2 , 说明该组影响因素存在相关, 有必要进行主成分分析。

变量相关矩阵的前 4 个较大特征根分别为 5.78、4.73、1.88 和 1.55, 它们分别解释总方差的 33.99%、27.84%、11.07% 和 9.11%, 一起解释总方差的 82.02%, 基本提供了原始数据的足够信息。根据计算出的特征向量, 可写出主成分与原始变量的关系如下:

$$a_1 = -0.13y_1 - 0.10y_2 - 0.11y_3 - 0.17y_4 - 0.17y_5 \\ - 0.19z_1 - 0.23z_2 - 0.32z_3 - 0.34z_4 - 0.32z_5 \\ - 0.15u_1 + 0.33u_2 + 0.31u_3 - 0.18v_1 - 0.25v_2 \\ + 0.23v_3 - 0.35v_4.$$

可以看到, 第 1 主成分 a_1 反映的是土壤水分受各个因素的综合影响。其中, 田间持水量、土壤容重、地理位置中的经度、水源情况和气温的系数为负, 纬度、海拔和日照时数的系数为正, 表现的是这两组变量的差异。除了 20 cm 的田间

持水量所占份额较小外，各个影响因素的量级相当。田间持水量、土壤容重、灌溉和降水越大，气温越高，越靠近河南，海拔越低，日照时数越少，主成分 a_1 值越小。结合前面的分析，主成分 a_1 与土壤水分状况成反比。

$$\begin{aligned} a_2 = & -0.389y_1 - 0.421y_2 - 0.386y_3 - 0.384y_4 \\ & - 0.376y_5 + 0.224z_1 + 0.179z_2 + 0.191z_3 \\ & + 0.147z_4 + 0.227z_5 - 0.001u_1 + 0.065u_2 \\ & - 0.102u_3 - 0.054v_1 - 0.136v_2 + 0.001v_3 \\ & + 0.076v_4. \end{aligned}$$

在第 2 主成分 a_2 中，田间持水量和土壤容重的系数较大、其余变量的系数较小。可以说第 2 主成分 a_2 主要反映的是田间持水量和土壤容重的差异及下垫面的特征。田间持水量越小，土壤容重越大，第 2 主成分 a_2 的值越大。结合前面的分析，主成分 a_2 与土壤水分的渗出状况成正比。即田间持水量越小，土壤容重越大，更易产生径流。

$$\begin{aligned} a_3 = & 0.02y_1 + 0.08y_2 + 0.06y_3 + 0.04y_4 + 0.07y_5 \\ & + 0.02z_1 + 0.17z_2 + 0.06z_3 - 0.19z_4 - 0.04z_5 \\ & + 0.56u_1 + 0.32u_2 - 0.36u_3 - 0.17v_1 - 0.13v_2 \\ & + 0.53v_3 + 0.21v_4. \end{aligned}$$

在第 3 主成分 a_3 中，地理位置和气象要素这几个变量的系数较大，其余变量的系数较小。可以说第 3 主成分 a_3 反映的主要是气候驱动信息。越靠近陕南，海拔越高，日照越低，第 3 主成分 a_3 的值越小。可以认为主成分 a_3 刻画的是一个区域受气候影响的墒情变化。

$$\begin{aligned} a_4 = & 0.09y_1 + 0.11y_2 + 0.25y_3 + 0.21y_4 + 0.07y_5 \\ & + 0.43z_1 + 0.39z_2 + 0.16z_3 + 0.10z_4 + 0.06z_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -0.39u_1 + 0.24u_2 + 0.19u_3 + 0.00v_1 - 0.48v_2 \\ & + 0.11v_3 - 0.08v_4. \end{aligned}$$

在第 4 主成分 a_4 中，反映的是中层田间持水量、表层土壤容重、经度、纬度、海拔和灌溉的综合影响。反映的是自然因素和人类活动（灌溉）对土壤水分的共同制约关系。

为了比较环境因素对各站点的土壤水分的综合驱动影响，按公式（5）计算综合评价函数 z^* 的值。代表站及各省平均的计算结果如表 3。由表可见，从田间持水量、容重等土壤物理因子、地理位置和气象要素等驱动因子单个角度而言，它们对陕西和河南土壤水分的影响力基本持平。但若考虑灌溉和降水及上述各因子的综合影响，它们对陕西各站土壤水分（平均排名第 11）的综合影响力大于河南各站（平均排名第 24）。相对而言，这些因素对陕西的绥德和榆林站的土壤水分的综合影响力最大（排名居第 1 和第 2）。对河南的固始和信阳站土壤水分的综合影响力最弱（排名居倒数第 1 和第 2）。这从一定程度上显示陕西，尤其是绥德和榆林的土壤水环境管理更复杂，更具挑战性。

5 结论

根据黄河两岸位于陕西和河南境内的 33 个农业气象站 1992~2005 年的实测土壤水分资料，计算了各站多年平均的 0~50 cm 各土层植被可利用土壤水分储量（A），分析了土壤水分的变异特征及其驱动因素。

表 3 主成分得分及排序

Table 3 Factor scores

站号	主成分 1		主成分 2		主成分 3		主成分 4		综合评价函数	综合名次
	得分	名次	得分	名次	得分	名次	得分	名次		
53646	2.66	2	2.77	1	0.63	12	0.67	7	2.20	1
53754	3.16	1	0.63	10	1.03	6	-0.26	18	1.63	2
53845	-0.19	19	-0.08	19	0.74	10	2.14	1	0.24	9
57034	-0.33	21	0.74	8	-1.07	27	0.69	6	0.05	15
57048	0.18	12	0.02	18	-1.04	25	0.58	12	0.01	16
57067	-0.46	22	-1.37	28	0.02	18	0.65	9	-0.58	25
57297	-2.39	32	-2.54	31	0.08	17	0.64	10	-1.77	32
58208	-2.97	33	-4.31	33	0.64	11	0.21	14	-2.59	33
陕西		11		17		17		12		12
河南		24		17		17		23		23

通过比较水平向和垂向土壤水分,发现土壤水分储量全年平均状态呈现西北(陕北)低以及南、东南和东部(陕南和河南)高的变化态势。黄土高原属于水分贫瘠区,在陕西绥德站出现水分的最低值。河南南部和陕南水分比较充沛,在河南信阳站出现水分最高值。土壤水分储量垂向空间变化分异不明显,各土层的土壤水分储量之间存在较好的相关性。

简单线性相关结果表明,土壤水分与田间持水量、土壤容重等土壤物理参数、灌溉、气象、海拔高度、经纬度这些影响因子的关系复杂。相对而言,只有田间持水量和灌溉与土壤水分呈现比较明显的线性正相关,纬度与土壤水分呈现比较明显的线性负相关。各相关要素中,灌溉与土壤水分储量的相关系数比降水与土壤水分储量的相关系数大,说明该区土壤水分较多地依赖灌溉。

主成分分析结果表明,仅仅下垫面因子(如田间持水量和容重等)、地理位置和气候因子对土壤水分的影响力在陕西和河南各站没有明显差异。但是上述因子若结合灌溉和降水,其综合作用对陕西的土壤水分的综合影响力大于河南。相对而言,这些因素对陕西的绥德和榆林站的土壤水分的综合影响力最大,对河南的固始和信阳站土壤水分的综合影响力最弱。

本研究搜集了 33 个农业气象站点的数据,来探求陕豫两省区域范围内的土壤水分及其驱动力的分布态势。由于站点所能代表的地域范围有限,要捕捉更细致的空间规律,还需要在更加密集的资料点分布的基础上进行更深入的研究。

参考文献 (References)

- [1] 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
- Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin. Relationship between regional soil moisture variation and climatic variability over East China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58** (3): 278~287
- [2] 林朝晖,杨小松,郭裕福. 陆面过程模式对土壤含水量初值的敏感性研究. 气候与环境研究, 2001, **6** (2): 240~248
- Lin Zhaohui, Yang Xiaosong, Guo Yufu. Sensitivity of Land Surface model to the initial condition of soil moisture. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (2): 240~248
- [3] Liu S, Mo X, Li H, et al. The spatial variation of soil moisture in China: Geostatistical Characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2001, **79** (2B): 555~574
- [4] 李海滨,林忠辉,刘苏峡. Kriging 方法在区域土壤水分估值中的应用. 地理研究, 2001, **20** (4): 446~452
- Li Haibin, Lin Zhonghui, Liu Suxia. The application of Kriging in estimating regional soil moisture. *Geographical Research* (in Chinese), 2001, **20** (4): 446~452
- [5] Liu S, Leslie L M, Speer M, et al. Approaching realistic soil moisture status in the Goulburn River catchment of southeastern Australia before and after a bushfire with an improved meso-scale numerical weather prediction model. IAHS Publication. No 282. 2003. 215~320
- [6] 邵晓梅,严昌容. 基于 surfer7.0 的黄河流域不同旱作类型区土壤水分动态变化的比较. 自然资源学报, 2005, **20** (6): 843~850
- Shao Xiaomei, Yan Changrong. Comparison of soil moisture dynamics based on surfer7.0 between different dry farming areas in the Yellow River basin. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 2005, **20** (6): 843~850
- [7] 赵秀兰,延晓冬. 近 20 年华北地区土壤水储量变化趋势及水分管理与调配对策. 气候与环境研究, 2006, **11** (3): 371~379
- Zhao Xiulan, Yan Xiaodong. The Trend of soil moisture storage in the last 20 years and its countermeasures of water management and regulation over north China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (3): 371~379
- [8] 郭维栋,马柱国,王会军. 土壤湿度——一个跨季度降水预测中的重要因子及其应用探讨. 气候与环境研究, 2007, **12** (1): 20~28
- Guo Weidong, Ma Zhuguo, Wang Huijun. Soil moisture — An important factor of seasonal precipitation prediction and its application. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2007, **12** (1): 20~28
- [9] Vinnikov K Y, Robock A, Speranskaya N A, et al. Scales of temporal and spatial variability of mid-latitude soil moisture. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 7163~7174
- [10] 雷志栋,杨诗秀,许志荣,等. 土壤特性空间变异性初步研究. 水利学报, 1985, **9**: 10~21
- Lei Zhidong, Yang Shixiu, Xu Zhirong, et al. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties. *Shuili.xuebao* (in Chinese), 1985, **9**: 10~21
- [11] Entin J K, Robock A, Vinnikov K Y, et al. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 11865~11877
- [12] 李巧珍,郝卫平,龚道枝,等. 不同灌溉方式对苹果园土

- 壤水分动态、耗水量和产量的影响. 干旱地区农业研究, 2007, **25** (2): 128~133
- Li Qiaozhen, Hao Weiping, Gong Daozhi, et al. Effects of different irrigation patterns on soil water dynamics, water use and yields in an apple orchard. *Agricultural Research in the Arid Areas* (in Chinese), 2007, **25** (2): 128~133
- [13] 居辉, 王璞, 周殿玺, 等. 不同灌溉时期的冬小麦土壤水分变化动态. 麦类作物学报, 2005, **25** (3): 76~80
Ju Hui, Wang Pu, Zhou Dianxi, et al. Soil moisture dynamics of winter wheat with irrigation of different stages. *Journal of Triticeae Crops* (in Chinese), 2005, **25** (3): 76~80
- [14] 李国振, 赵成义, 王玉朝. 不同灌溉对阜康地区冬小麦产量及土壤水分动态变化的影响. 干旱区地理, 2001, **24** (2): 192~189
Li Guozhen, Zhao Chengyi, Wang Yuchao. Effects of different irrigation modes on winter wheat yield and soil moisture change in Fukang Area, Xinjiang. *Arid Land Geography* (in Chinese), 2001, **24** (2): 192~189
- [15] 王葆芳, 朱灵宜. 干旱区杨树人工用材林灌溉量与土壤水分的关系. 林业科学研究, 1995, **8** (1): 94~100
Wang Baofang, Zhu Lingyi. The relationship between different amounts of irrigation and changes of soil water content in Populus X xiaozhunian cv. 'popularis' plantation in arid area in inner Mongolia. *Forest Research* (in Chinese), 1995, **8** (1): 94~100
- [16] 刘苏峡, 莫兴国, 李俊, 等. 土壤水分和土壤-大气界面对麦田水热传输的影响. 地理研究, 1999, **18** (1): 24~30
Liu Suxia, Mo Xingguo, Li Jun, et al. The effects of soil moisture and soil-atmosphere interface on water-heat transfer in winter wheat field. *Geographical Research* (in Chinese), 1999, **18** (1): 24~30
- [17] 谢贤群, 王立军. 水环境要素观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1998
Xie Xianqun, Wang Lijun. *Observation and Analysis of Water Environment Factors* (in Chinese). Beijing: Chinese Standard Press, 1998
- [18] 国家气象局. 农业气象观测规范 (上卷). 北京: 气象出版社, 1993
National Meteorology Administration. *The Standard of the Agro-meteorology Observation* (Part 1) (in Chinese). Beijing: Meteorology Press, 1993
- [19] 陈传军. 土壤凋萎湿度试验测定的技术方法. 四川气象, 2006, **26** (1): 26~27
Chen Chuanjun. The observation of wilting point. *Sichuan Meteorology* (in Chinese), 2006, **26** (1): 26~27
- [20] 张翠英, 朱爱民, 孙翠凤, 等. 土壤凋萎湿度测定指示作物的选择试验. 现代农业科技, 2007, **17**: 138
Zhang Cuiying, Zhu Aimin, Sun Cuifeng, et al. The choice of the index crop for the observation of wilting point. *Modern Agricultural Science and Technology* (in Chinese), 2007, **17**: 138
- [21] 《中国水利百科全书》编辑委员会. 中国水利百科全书. 北京: 中国水利水电出版社, 2006
Editorial Committee of Encyclopedia of Chinese Water Resources. *Encyclopedia of Chinese Water Resources* (in Chinese). Beijing: China Water Power Press, 2006
- [22] Hotelling H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, 1933, **24**: 417~441
- [23] Pearson K. On linear and planes of closest fit to system of points in space. *Philosophical Magazine*, 1901, **2** (6): 559~572
- [24] 高策理, 蔡斌. 使用主成分分析进行综合排名时出现高相关指标的研究. 数学的实践与认识, 2004, **34** (12): 21~24
Gao Celi, Cai Bin. A research on usage of principal component analysis in synthetic ordering with highly correlative variables. *Mathematics in Practice and Theory* (in Chinese), 2004, **34** (12): 21~24
- [25] 赵秀兰. 黑龙江省土壤水分常数的空间分布特征. 黑龙江气象, 2001, (4): 8~11
Zhao Xiulan. The geographical and vertical distribution characteristics of soil moisture in Heilongjiang. *Heilongjiang Meteorology* (in Chinese), 2001, (4): 8~11
- [26] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤. 北京: 科学出版社, 1987
Xiong Yi, Li Qingkui. *China Soil* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1987