

中国西北地区土壤湿度的气候特征

周芳存¹, 巩远发², 阿米娜·麦图迪尔³

(1. 四川省巴中市气象局, 四川 巴中 636000; 2. 成都信息工程大学大气科学学院 四川 成都 610225; 3. 新疆气象局, 新疆 民丰 848599)

摘要:通过研究西北地区土壤湿度的时空变化规律,为以后更有效地分析土壤湿度与降水的相互关系及影响机制,提高该地区的干旱预测能力,利用日本气象厅 JMA 的 1979~2012 年逐月平均土壤湿度再分析资料和中国国家气候中心 160 站逐月降水资料,运用自然正交函数(EOF)分解、相关关系分析等方法,对该地区土壤湿度的时空变化特征作了详尽的分析,并研究不同时滞西北地区土壤湿度与该区域夏季降水的关系。分析表明:西北地区土壤湿度的空间分布差异显著,总体上呈现东南湿,中部干、西部天山以北地区又增湿的特征。33 年来土壤湿度的年际变化呈变湿的趋势,同时土壤湿度的变化也具有季节性差异,表现为春季土壤最湿,夏季略有变干,进入秋、冬季逐渐变干,特别是在冬季保持在最低水平。西北地区土壤湿度与夏季降水主要呈正相关关系,空间分布上新疆西北部相关性最为显著,时滞上秋季土壤湿度与夏季降水的正相关关系最为显著,即西北地区夏季降水对土壤湿度的影响具有滞后性。

关键词:气候学;气候特征;西北地区;土壤湿度;时空变化;降水

0 引言

土壤湿度作为地表水文过程的一个综合指标^[1],积累了地表水文过程的大量信息,是研究陆地水循环和能量循环的一个重要变量。土壤湿度通过改变地表反照率、热容量以及向大气输送感热、潜热等途径来影响气候,还能够通过陆气相互作用进一步影响近地层大气及气候变化,被认为是陆面过程中重要的物理量之一。同时,土壤湿度也受到地表径流、壤中流、土壤下渗的综合影响。有观点认为^[1],土壤湿度是影响气候变化仅次于海表温度的第二大重要因子,尤其是在中高纬地区,对气候的影响甚至与海洋相当。先前许多研究工作证实了陆面状况对局地、区域乃至全球大气环流和气候特征均有重要的作用,尤其与降水以及温度有着密切关系。因此研究土壤湿度的时空变化和对气候变化的影响有着重要的意义。

中国西北地区是全球同纬度最干旱的地区,干旱、半干旱区面积占全国总面积的 30 %。这里生态环境脆弱,气候环境变化剧烈,是造成西北地区大面积沙漠化的重要原因。据统计,在陆面上,65 % 的降水来自于陆地表面蒸发,35 % 来自海洋的水汽输送^[2],这说明陆面降水很大程度来自于陆面的蒸发,而蒸发的大小又和土壤湿度密切相关。因此,西北地区土壤的干湿状况不仅直接影响该地的降水,而且对该地的气候

状况也有重要的影响。中国科学家很早就对土壤湿度以及它对气候的影响所有关注及研究^[3-4],但是大部分研究都还是主要针对东部地区,对于干旱半干旱地区土壤湿度的研究甚少。究其主要原因是资料的缺乏,目前国内学者对土壤湿度的研究应用主要是基于农业气象站的旬土壤湿度资料。但由于土壤湿度具有非常大的时空变率,因此对他的观测需要全球范围内的高分辨率的观测网资料,而农业气象站的数据尤其是在西北地区,站点稀少且分布不均。为解决这一问题,采用日本气象厅浅层土壤湿度的格点再分析资料。

近 40 年来一些学者通过数值模拟深入研究了土壤湿度对中国短期气候的影响。孙丞虎等^[5]基于中国土壤湿度站点资料,分析淮河流域土壤湿度异常与后期气候异常的关系,研究指出各层土壤湿度与前期和同期降水呈显著正相关关系,与约半年后的降水呈负相关关系。由于受观测资料的限制,目前关于土壤湿度对气候影响的工作主要借助数值模式,刘永强和叶笃正(1992 年)的模拟结果表明,土壤湿度在短期气候异常的持续过程中起着主导作用,而土壤热力状况的影响相对较小,土壤湿度的初值在模式中的记忆时间很长,对模拟结果影响很大(张晶等)。纵观土壤湿度的研究历史和现状发现,对于西北地区(干旱地区)土壤湿度的研究结果甚少,

通过研究西北地区土壤湿度的时空变化规律,并分析土壤湿度与降水的相互关系及影响机制,为今后能更有效地研究西北地区降水规律和提高干旱预测能力提供一些参考。

1 资料概况与分析方法

西北地区的范围选为 33°N 以北、 108°E 以西的中国地区,包括新疆、甘肃全省和青海、陕西、宁夏、内蒙古的大部分地区,使用日本气象厅 JMA 再分析资料、1979~2012 年中国西北地区浅层(0~5 cm)逐月平均土壤湿度资料,和国家气候中心整理的 1979~2012 年中国 160 个站点逐月降水资料。

主要分析方法:自然正交函数(EOF)方法、相关关系分析等;EOF 方法,又称主成分分析方法。利用 EOF 分析方法对西北地区各季节土壤湿度进行时空分布特征分析。EOF 分析方法由于其展开方式是由要素场序列本身的特征确定典型场,而不作事先的人为规定,因而在气象上得到广泛应用,是一种分析矩阵数据中的结构特征和提取主要数据特征量的方法。此外相关关系分析法是产生一个空间映射的时态相关系数来量化分析夏季降水与不同季节土壤湿度的相关性大小,从而分析夏季降水与土壤湿度的相互关系及影响。

2 土壤湿度的气候特征

中国西北地区地域辽阔、地形复杂,不同地区间的气候状况差异显著。图 1 是 1979~2012 年西北地区平均土壤湿度空间分布图,可看出土壤湿度呈现东南湿、中部干、西部天山以北地区又增湿的空间分布特征。全区域内存在两个明显的干区,一个是在内蒙古西部一带的戈壁、沙漠地区,另一个是在新疆塔里木盆地的沙漠地区,均存在土壤湿度的低值中心(0.05)。由于受到天山地形作用的影响,天山以南、以北土壤干湿差异显著,以北一带为新疆土壤相对湿润区。西北地区的东南部即甘南和青海东部地区土壤湿度最大,存在 0.65 的湿中心,其干湿状况基本处在内蒙古的干旱和江淮的湿润之间,属于西北地区土壤湿润区。

33 年来西北地区年平均土壤湿度呈线性增湿的趋势(图略),20 世纪 80 年代前期土壤最干且波动小,其平均值约为 0.28;80 年代后期到 90 年代末土壤湿度进入一个相对湿润阶段,平均值约为 0.33;21 世纪土壤湿度呈明显波动增加趋势,2010 年为 33 年以来的最湿润年份。

有关研究指出:土壤湿度的季节循环对大气的季节循环有重要的影响,主要表现在对潜热和感热季节循环的影响。中国处在东亚季风区,其季节变化显著,因此,有必要首先对土壤湿度的季节特征进行讨论。

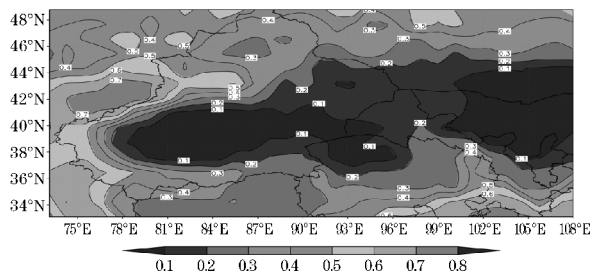
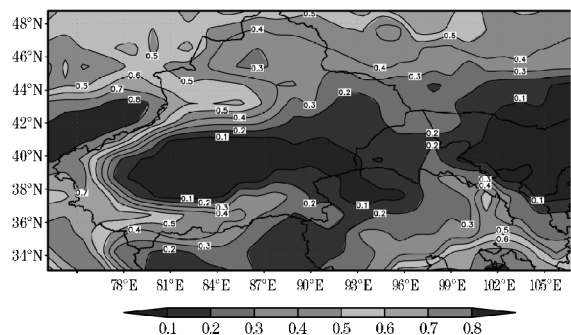
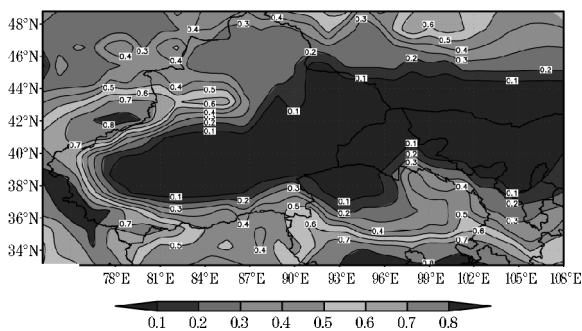


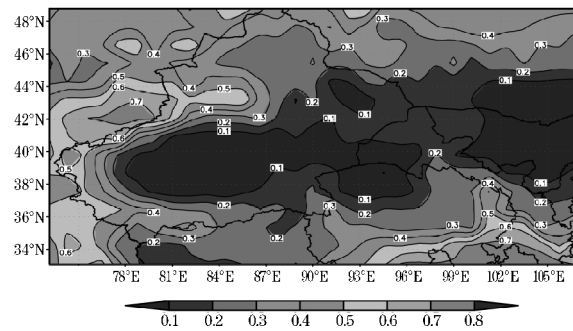
图 1 西北地区 1979~2012 年平均土壤湿度空间分布



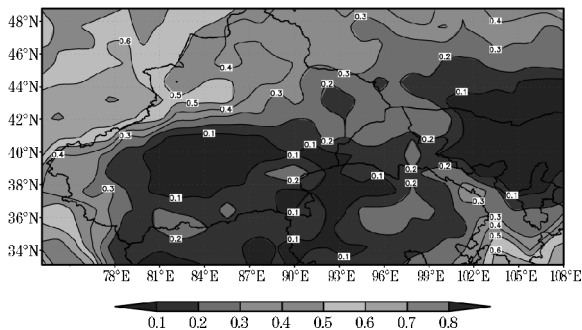
(a) 春



(b) 夏



(c) 秋



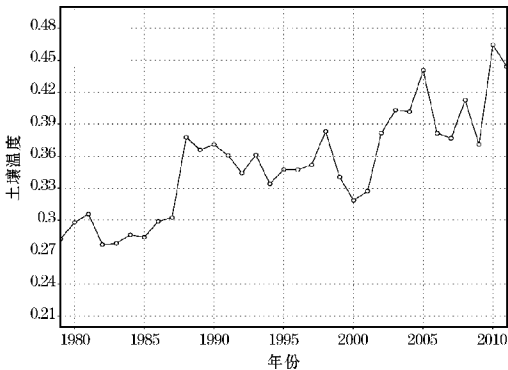
(d) 冬

图 2 1979~2012 年西北地区春、夏、秋、冬季土壤湿度的空间分布

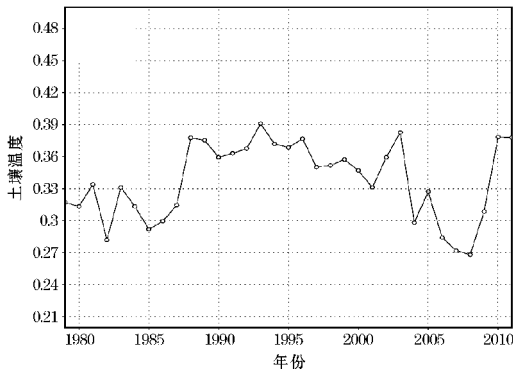
图2表示西北地区春夏秋冬各季节土壤湿度的空间分布,利用每年各季节的土壤湿度平均值来表示此年该季节的土壤湿度,然后对季节空间分布特征进行分析。对比4张图可看出在各季节新疆塔克拉玛和内蒙古西部为明显干区,天山以北、甘南和青海东部为相对湿润区,干湿区分布位置各季节相对稳定,但干湿区中心值和范围存在季节性震荡变化,夏季图2(b)大值中心位于青海东南部和甘南等地为0.8,图2(a)、2(c)春秋大值中心值为0.7及图2(d)冬季的0.5~0.6为湿度最大值,同时4个季节中湿度>0.4的区域在夏季最广。同时发现,西北地区东南部与中部土壤湿度在各季节呈反位相变化,即夏季东南部明显变湿而中部变干,秋季东南部变干而中部变湿,冬季东南部继续变干而中部变湿,春季东南部变湿而中部变干。而这种反位相变化现象可能和西北地区降水分布极不均匀有关,即是青海东南部和甘南地区夏季降水丰富、处于内蒙古的干旱和江淮之间的湿润气候带,而中部沙漠地区常年降水稀少、辐射蒸发量大。

从各季节土壤湿度的年际变化看,图3(a)、3(d)

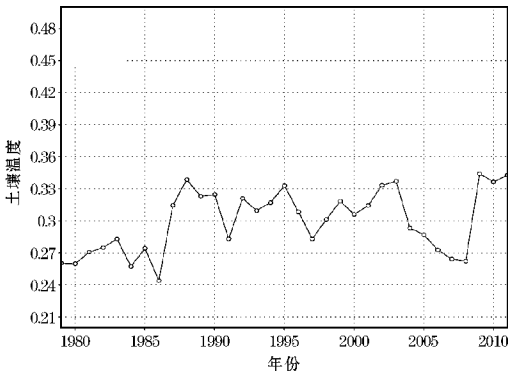
(春冬季)呈波动上升趋势,且时间上图3(d)波动曲线滞后于图3(a)约2~3年。而图3(b)、3(c)大致呈抛物线变化,表现为20世纪90年代变湿,21世纪又变干,且在1988年、2003年、2009年出现该季节土壤湿度的极大值。土壤湿度的这种季节变化与郭慕萍^[4]做的关于西北地区54年降水变化趋势的研究结果有所对应,即春季降水呈弱的线性增长趋势,而夏季降水略有减少、秋季降水明显减少、冬季降水呈增多趋势。对西北地区不同季节土壤湿度值进行比较,不难发现春季土壤湿度最大,夏季次之,冬季最小。春季气温回升引起地表冰雪融化、冻土解冻等使土壤湿度急剧增加,为最湿润季节。虽然西北地区降水主要集中在夏季,但由于初夏降水还未开始以及降水量较小,气温高蒸发量大而使土壤水分缺失,而使湿度低于春季。秋季降水减少,土壤变干。冬季降水少、气温骤降,产生冻土,土壤水分严重流失,湿度急剧减小。以上土壤湿度变化特征说明,西北地区的降水与温度对土壤湿度的变化都具有一定的影响,降水尤为重要,但在降水稳定时,土壤湿度主要受温度变化的影响。



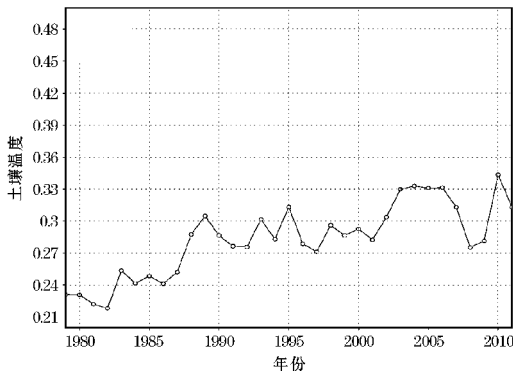
(a) 春



(b) 夏



(c) 秋



(d) 冬

图3 1979~2012年西北地区春、夏、秋、冬季土壤湿度的年际变化

3 基于 EOF 方法的土壤湿度时空变化分析

EOF 分析法是将大量资料信息进行浓缩,用几个模态同时对要素场的时空变化规律进行分析。文中对每季节的平均土壤湿度资料进行距平计算预处理,对处理后的数据按季节平均值、年值组成 33 个(32×15)资料阵,再分别对他们进行 EOF 分解。EOF 分解得到的各个模态(或称为主分量、特征向量等)在空间上是正交的,且收敛快,前几个模态就可以很好地解释原始序列

表 1 土壤湿度场 EOF 分解的各模态方差贡献率及累积方差/%

特征向量	1	2	3	4	5	累积贡献
方差贡献(春)	43.528	15.225	6.556	3.745	3.180	72.235
方差贡献(夏)	32.878	28.582	10.390	4.905	3.254	80.008
方差贡献(秋)	30.644	17.468	10.447	6.264	4.197	69.021
方差贡献(冬)	28.260	9.443	8.431	5.459	4.498	56.091

EOF 方法分解出的特征向量正好能够反映气象场变化的空间结构特征。由图 4 各季节第一特征向量分布图看,特征值在全区域(尤其是变化敏感区)内 4 个季节符号相同,都为负值,说明了西北地区土壤湿度变化方向具有一致性,即全区域土壤湿度普遍增加,或普遍减少,这主要是受大尺度天气系统影响的结果。但是不同季节土壤湿度敏感区有所差异,春、冬季位于甘肃嘉峪关附近(中心值为-0.12),夏季位于新疆西部(中心值为-0.06),秋季敏感区范围宽广,主要位于甘肃南部和青海东部(中心值为-0.08)。值得注意的是,新疆塔克拉玛干沙漠和内蒙古西部地区在 4 个季节都为弱变化区,即该区域土壤湿度在各季节都表现为显著干区。

EOF 分析方法不仅能用其特征向量场来描述要素场的主要分型,而且可用时间系数特征值分析年际变化规律。利用图 5 时间系数并结合年际变化可以看出时间系数越大,土壤湿度越小,在春、秋、冬季土壤湿度的时间序列呈一致下降趋势,这与土壤湿度在该季节历年总体上升的年际变化趋势一样。而夏季时间系数表现为先下降再上升的变化,对应土壤湿度值在该季节先变湿再变干的特征。

广大的西北地区雨季短、雨量少而集中,同属于干旱、半干旱气候区,夏季(6~8月)的降水量可占全年降水量的 1/2~1/3,因此研究西北夏季土壤湿度特征的重要性显得尤为重要。夏季逐年土壤湿度场 EOF 分解前 3 个模态的累积方差贡献率达到71.850%,其

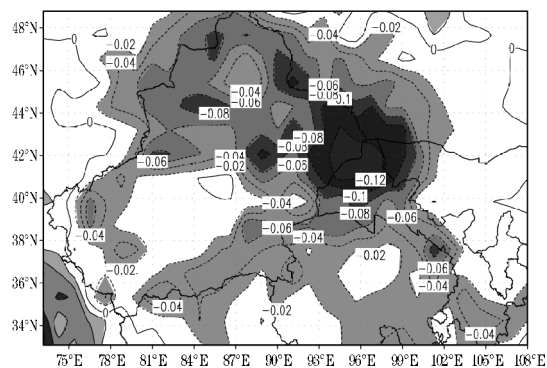
的大部分方差,故一般仅取前几个模态分析即可。

如表 1 所示,取每个资料阵的前 5 个特征向量,其累积方差贡献率均在50%以上,最高的达80.008%(夏季),说明每个资料阵的前 5 个特征向量就能较完整地反映土壤湿度时空变化特征。各季节第一特征向量场的方差贡献依次为 43.528%、32.878%、30.644%、28.260%,该模态的方差贡献最大,代表土壤湿度变化的主要分布形式。因此用第一模态的特征向量和时间系数分别讨论空间分布和年际变化的规律是有其实际意义的。不难看出春、夏两季第一模态贡献方差最好,且后面各模态收敛速度较快。

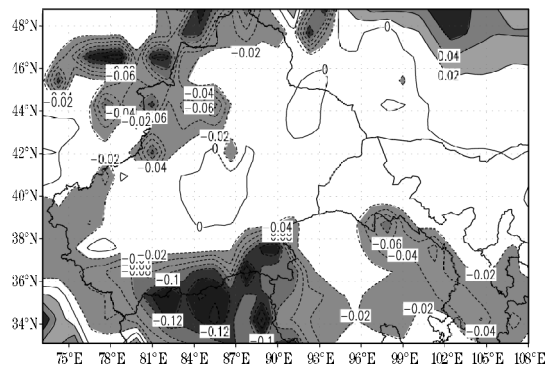
中前 3 模态方差贡献依次为32.878%、28.582%、10.39%,收敛速度快,前三模态可基本代表该季节土壤湿度的分布特征(表 1)。综合图可以看到特征值大小均大致表现为东南部大、中部小、天山以北又增大的变化,对应西北地区中部在夏季持续干旱、东南部及西部较为湿润的气候特征。同时图 5(b)夏季第一时间系数呈‘+’‘-’‘+’的震荡变化特征,与土壤湿度呈向下抛物线的年际变化趋势对应,反映了该季节土壤湿度先变湿再变干的年际变化趋势。结合第一特征向量场分析夏季土壤的干湿变化,第一特征向量全区域负值,时间系数越大,土壤越干,越小土壤越湿。1979~1987 年时间系数为正,土壤趋于变干;1988~2003 年,时间系数为负,土壤处于变湿阶段;2003~2011 年土壤湿度处于波动变化阶段。在 1985 年为最干的年份,1993 年为最湿年份,21 世纪以来 2003 年为最干年份。同样,根据第一时间系数变化趋势预测未来几年西北地区夏季土壤湿度略有变干趋势。

4 土壤湿度与夏季降水的相关性分析

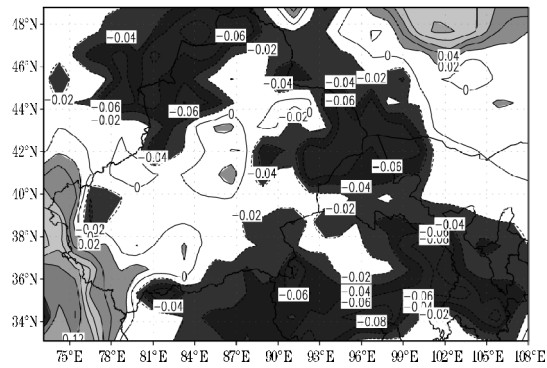
土壤湿度的变化与降水有密切的关系,尤其是在浅层,土壤湿度对降水的变化十分敏感。西北地区雨季短、雨量集中,夏季(6~8月)的降水量可占全年雨量的 1/2~1/3,故夏季降水对土壤湿度时空变化影响尤为突出。



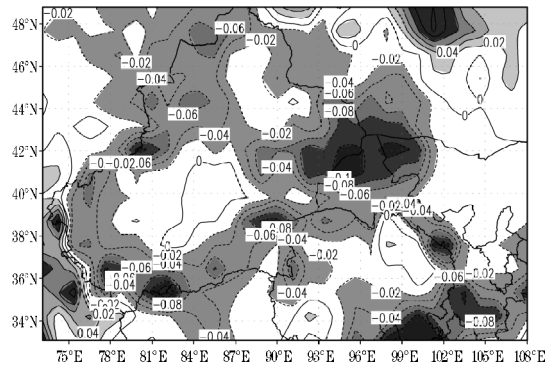
(a) 春



(b) 夏



(c) 秋



(d) 冬

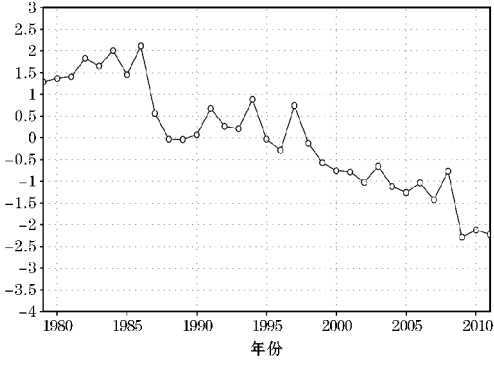
图4 四季土壤湿度场 EOF 分析的第一特征向量分布



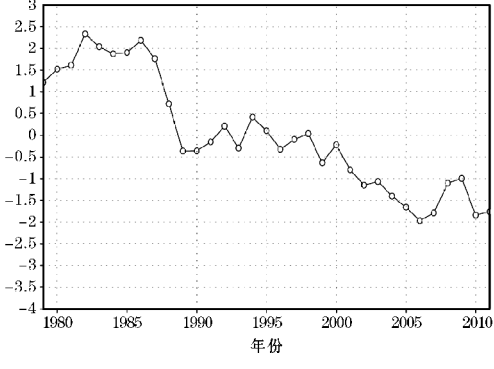
(a) 春



(b) 夏



(c) 秋



(d) 冬

图5 四季土壤湿度场 EOF 分析的第一时间系数

从图6西北地区夏季降水的空间分布图可以看出,西北地区夏季降水从东南至西北有显著的递减趋势。青海、甘肃南部是降水量最大的区域,最大可达400 mm,降水最少的地区位于新疆中部、甘肃南部以及内蒙古西部,尤其是在新疆吐鲁番夏季降水量几乎为0 mm。新疆地区夏季的降水由于受天山地形的影响较大,分布极为不均,主要呈现北疆多于南疆、西部多于东部、山区多于盆地的特征。整个西北地区降水量东多西少、南多北少的这种空间分布特征和土壤湿度的空间分布极其一致。分别通过讨论夏季降水与同期(夏)、前期(春)、后期(秋)的平均土壤湿度的相关性,来分析降水与土壤湿度相互关系及影响。

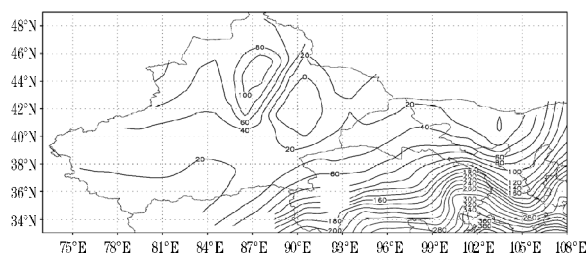


图6 1979~2012年西北地区夏季降水量的空间分布

根据地表水收支方程可知,降水的增多有利于土壤湿度的增加,而土壤湿度的增加(在未饱和土壤中)同样使得地表蒸散增加,地表蒸散的增加为后期降水的增加提供了水汽,最终将使降水进一步增加。分别通过讨论夏季降水与同期(夏)、前期(春)、后期(秋)的平均土壤湿度的相关性,分析降水与土壤湿度相互关系及影响。

图7(a)是夏季降水与同期夏季土壤湿度的相关系数图,除新疆吐鲁番、内蒙古呼伦贝尔等荒漠地区为负相关外,其他地区均为正相关区,即降水与土壤湿度主要呈同位相变化。准噶尔盆地、和田东南部土壤湿度与降水的相关性最好,通过 $\alpha=0.1$ ($r=0.29132$)的显著性检验,即说明该区域夏季土壤湿度对同期降水变化响应强烈。吐鲁番和呼伦贝尔为两个异常负相关中心,与其独特的地形和气候特征有关,均属戈壁荒漠化地形,干旱炎热、降水少蒸发量大,因此土壤湿度与降水关系异常。

图7(b)表示前期春季土壤湿度与夏季降水的相关性,由于地形复杂原因,导致区域差异明显。青海东部为正相关区,相关系数通过显著性检验,即春季土壤湿度增加对夏季降水的增加具有正贡献。甘肃酒泉地区和内蒙古的阿拉善盟地区为负相关显著区,春季EOF分析结果显示土壤处于变湿状态,推论该区域降水应呈减少的变化趋势,这与该区域夏季降水资料显示结果一致。

从图7(c)夏季降水与后期秋季土壤湿度的相关系数来看,正负相关区分布与图7(a)相似,但相关性明显增强,新疆仍表现东西部的负正差异,青海、甘肃、内蒙古等地区仍表现为弱相关关系,但较同期(夏季)影响有所增强。准噶尔盆地的正相关大值中心略有南下,吐鲁番盆地负相关增强并通过显著性检验,内蒙古西部有显著负相关区出现,以上说明了西北地区夏季降水对土壤湿度的影响具有滞后性,即夏季降水对秋季土壤湿度的影响大于夏季。

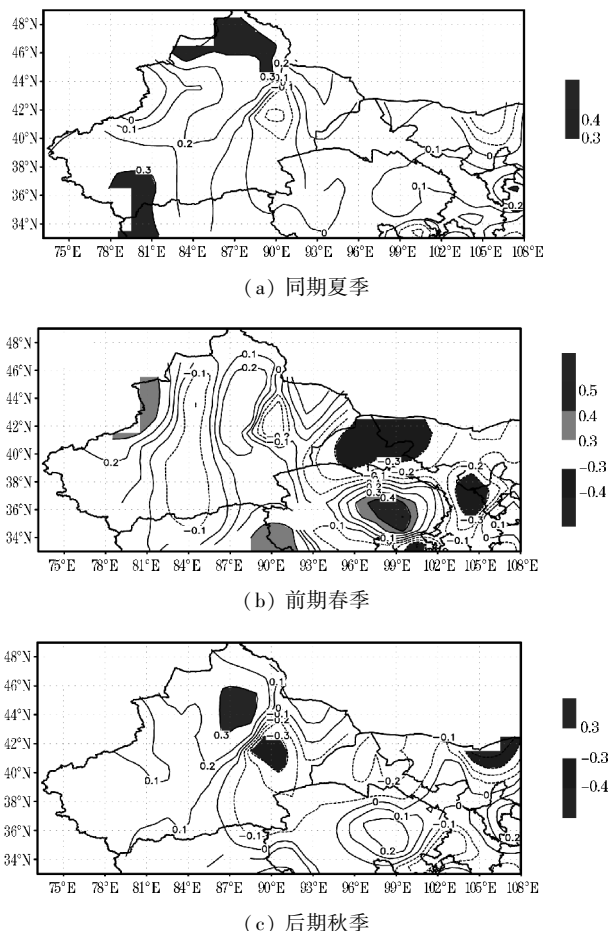


图7 夏季降水与同期夏季、前期春季、后期秋季土壤湿度的相关分布 (阴影区表示通过90%的信度检验)

5 结论

(1)西北地区土壤湿度整体呈现东南湿、中部干、天山以北又变湿的空间分布特征,不同季节干湿区的空间位置相对稳定,其中新疆塔克拉玛和内蒙古西部地区为常年干旱区,青海东部和甘南地区为相对湿润区。

(2)1979~2012年西北地区土壤湿度基本呈波动增湿的年代际变化趋势。全区域土壤湿度的季节变化显著,春季最湿、夏季次之、秋冬季土壤湿度相继减小。

(3)基于 EOF 分析法,西北地区土壤湿度变化的空间分布具有较高的一致性,尤其是在春夏季。西北地区东部湿润区为土壤湿度变化的敏感区,而新疆中部和内蒙古西部的常年干旱沙漠区为土壤湿度的弱变化区。33 年来西北大部分地区各季节土壤湿度呈波动增湿的总趋势,且具有明显的年际振荡。

(4)西北大部分地区土壤湿度与降水呈正相关关系,西北地区秋季土壤湿度与夏季降水的相关性更强,尤其是在新疆地区,夏季降水对土壤湿度的影响具有滞后性。

参考文献:

- [1] 王万秋. 土壤温湿异常对短期气候影响的数值模拟试验[J]. 大气科学,1991,15(5):115-123.
- [2] 王瑞,李伟平,刘新,等. 青藏高原春季土壤湿度异常对我国夏季降水影响的模拟研究[J]. 高原气象,2009,28(6):1233-1241.
- [3] 孙丞虎,李维京,张祖强,等. 淮河流域土壤湿度异常的时空分布特征及其与气候异常关系的初步研究[J]. 应用气象学报,2005,16(2):121-138.
- [4] 郭慕萍,王志伟,秦爱民,等. 54 年来中国西北地区降水量的变化[J]. 干旱区研究,2009,(1).
- [5] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京:气象出版社,2000.
- [6] 宋连春,张存杰. 20 世纪西北地区降水量变化特征[J]. 冰川冻土,2003,25(2):143-148.
- [7] 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[J]. 地球科学进展,1999,14(3):299-305.
- [8] 李理,李栋梁. 青藏高原土壤湿度对黄河流域夏季降水的影响[J].
- [9] Walker J, Row n tree P R. T he effect of soil moisture on circulation and rainfall in a tropical model [J]. Quart J Roy Meteor.
- [10] Chahine T M. The hydrological cycle and it s influence on climate [J]. Nature,1992,359:373-380.
- [11] Shukla J. Mintz Y. The influence of land-surface evaporation on the earth's climate[J]. 1982.
- [12] Pan Y X, Wang X P. Factors controlling the spatial variability of surface soil moisture within revegetated-stabilized desert ecosystems of the tengger desert [J]. northern China. Hydrol Processes, 2009, 23: 1591-1601.
- [13] D odorico P, Porporato A. Preferential states in soil moisture and climate dynamics[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2004, 101: 8848-8851.
- [14] 薛晓萍,王新,张丽娟,等. 基于支持向量机方法建立土壤湿度预测模型的探讨[J]. 土壤通报,2005,16(2):129-138.
- [15] 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[J]. 气象学报,2000,8(3):278-287.