

# 我国北方陆 - 气耦合特征

李颖慧

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2022年8月21日; 录用日期: 2022年9月14日; 发布日期: 2022年9月21日

## 摘要

陆 - 气相互作用是在陆地表面发生的一系列复杂过程, 是影响天气以及气候演变的重要途径。本文选取了纬度 $33^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$ , 经度 $100^{\circ}\text{E}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 的区域, 将中国北方分为东北区, 内蒙古高原区, 黄土高原区, 华北区和西北区五个区域, 并进一步使用土壤湿度、气温、降水等资料, 研究我国北方土壤湿度与气温和降水的相互作用的时空分布特点以及土壤湿度 - 气温和土壤湿度 - 降水相关系数, 探究我国北方陆 - 气耦合特征, 得到的主要结论如下: 1) 我国北方土壤湿度和降水强度在不同季节均表现为从西北到东南逐渐增加, 季节平均气温表现为整体上从北到南逐渐增大。2) 土壤湿度 - 气温强的正耦合区域位于西北区、华北区东部和东北区; 强的负耦合区域位于华北区北部。土壤湿度 - 降水强的正耦合区域位于华北区北部和内蒙古高原区西部; 强的负耦合区域位于华北区南部和内蒙古高原区中部。我国北方陆 - 气耦合季节差异明显, 夏季耦合强度强于冬季。3) 在土壤湿度0.3到0.4时, 存在强的正负土壤湿度 - 气温耦合强度。在气温较低时, 存在强的正耦合; 在气温较高时, 存在强的负耦合。土壤湿度 - 降水耦合强度随土壤湿度变化不明显。在降水量较小时, 土壤湿度 - 降水耦合强度绝对值较大; 在降水量较大时, 存在强的负耦合。

## 关键词

土壤湿度, 气温, 降水, 陆 - 气耦合, 中国北方

# Characteristics of Land-Atmosphere Coupling in Northern China

Yinghui Li

College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Aug. 21<sup>st</sup>, 2022; accepted: Sep. 14<sup>th</sup>, 2022; published: Sep. 21<sup>st</sup>, 2022

## Abstract

Land-air interaction is a series of complex processes that occur on the surface of land and is an important way to affect weather and climate evolution. In this paper, the areas in latitude of

33°N~45°N and longitude of 100°E~125°E are selected, and the northern part of China is divided into five regions: Northeast China, Inner Mongolia Plateau, Loess Plateau, North China and Northwest China, and further use soil moisture, temperature, precipitation and other data to study the spatio-temporal distribution characteristics of the interaction between soil moisture and air temperature and precipitation in northern China, as well as the correlation coefficients of soil moisture, temperature and soil moisture and precipitation, and explore the characteristics of land-air coupling in northern China. The main conclusions are as follows: 1) The soil moisture and precipitation intensity in northern China gradually increase from northwest to southeast in different seasons, and the average seasonal temperature gradually increases from north to south as a whole. 2) The positive coupling area of soil moisture-temperature is located in the northwest region, the eastern and northeastern regions of north China; The strong negative coupling region is located in the northern part of North China. The positive coupling area of soil moisture-precipitation intensity is located in the northern part of North China and the western part of Inner Mongolia Plateau; and the strong negative coupling region is located in the south of north China and the middle of Inner Mongolia Plateau. The seasonal difference of land-atmosphere coupling in northern China is obvious, and the coupling intensity in summer is stronger than that in winter. 3) When the soil moisture is 0.3 to 0.4, there is a strong positive and negative soil moisture-temperature coupling intensity. At lower temperatures, there is a strong positive coupling; At higher temperatures, there is strong negative coupling. The soil moisture-precipitation coupling intensity does not change significantly with soil moisture. When the precipitation is small, the absolute value of soil moisture-precipitation coupling intensity is relatively large; There is strong negative coupling when precipitation is high.

## Keywords

Soil Moisture, Temperature, Precipitation, Land-Air Coupling, Northern China

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

地球是一个包含五大圈层的有机的整体，气候变化是其他圈层与大气圈相互作用相互影响在大气圈的反映[1]。1984年国际气象组织(WMO)和国际科联(ICSU)强调了陆气相互作用以及陆面过程研究的重要性。陆面过程及陆气相互作用逐渐引起社会乃至整个科学界的关注[2]。陆-气相互作用定义为在陆地表面上发生的一系列复杂过程，以及这些过程和大气的影响。陆地表面受许多因素影响，如行星边界层的物理量通量和自由大气层的物理量通量[3]。以往的研究表明，陆-气相互作用是各种反馈的物理过程共同作用的结果。风速和蒸发通量是正反馈，水汽通量和边界层湍流是正反馈，感热通量和边界层湍流是正反馈，蒸发通量和陆地表面温度是负反馈，物理量受多个反馈影响，过程复杂[4]。

研究陆-气相互作用有重要意义，其是预报天气需要考虑的重要过程。陆-气物理量交换过程主要取决于陆面状态。陆面变量的改变导致新交换过程的建立，改变大气。陆面是方程的下边界条件。陆面接触大气底部，陆面性质决定动力过程中源汇项。大气对陆面的变化响应迅速。大气受地表因子影响，地表反照率主要影响地表长波辐射，土壤湿度主要影响降水蒸发，地表粗糙度主要影响风速[5]。研究陆-气相互作用，应用于天气预报和气候预测，结果更接近真实情况，为提前预知灾难并制定对策提供基础。

由于复杂多变的非均匀下垫面特征，陆气耦合的过程和机理十分复杂。近些年来。许多学者进行了很多陆面过程观测，比如全球陆-气耦合试验(global land-atmosphere coupling experiment, GLACE)用于陆

气耦合强度和陆气耦合热点区域的研究；局地陆-气耦合试验(LoCo)，主要开发综合指标来量化局地陆气相互作用的关系和反馈机制[6]。研究表明，耦合有3个关键过程，土壤湿度和气温的相互影响，土壤湿度和降水的相互影响，植被和气候的相互影响[7]。

土壤中储存的水分是陆地总水量的一个重要部分，是气候系统的关键组成部分。人们可以通过土壤湿度和气温、降水的关系来理解陆-气相互作用。土壤湿度受大气变化影响并表现迅速，二者变化相互影响密不可分，改变土壤湿度的重要因子包括降水和蒸发[4]。有研究表明，陆-气耦合热点区域均位于干湿气候过渡带[8]。在干旱地区，蒸散小，土壤湿度气候相互作用弱；在湿润地区，是辐射限制型。在干湿气候过渡带，土壤湿度变化对气温和降水影响较大，是土壤湿度限制型，是陆-气耦合剧烈的地区[9]。

尽管近年来许多学者在陆气相互作用研究领域开展了大量研究工作，但针对于我国北方地区陆气耦合特征的研究还相对较少。基于此，本文使用美国气候预测中心的土壤湿度资料以及中国地表数据集的降水及气温资料，研究我国北方土壤湿度与气温和降水的相互作用的时空分布特点，量化我国北方不同区域陆气耦合强度，分析我国北方区域性陆气耦合强度的季节分布特征，以期为深入认识陆气相互作用和区域气候系统提供依据[10]。

## 2. 资料来源与方法介绍

陆地可以通过一系列过程影响大气的气温、降水等，了解陆-气相互作用并应用在天气预报和气候预测上，预报预测会更真实全面。本文主要研究我国北方部分区域，从1982年到2011年陆-气相互作用相关系数的时空分布，以及相关系数与因子的关系。

本文选取中国北方部分区域，纬度 $33^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ，经度 $100^{\circ}\text{E}\sim 125^{\circ}\text{E}$ ，并将其分为以下五个区域，分别为，东北区、内蒙古高原区、黄土高原区、华北区和西北区。

利用美国气候预测中心(CPC-Climate Prediction Center)提供的1982~2011年每月平均的土壤湿度(sm)数据，该资料能较好描述土壤湿度的特征和变化。

利用中国研制的中国地表数据集(CMFD-China Meteorological Forcing Dataset)提供的1982~2011年每月平均降水量(p)数据以及气温(ta)数据。

陆-气相互作用不是简单的过程，是一系列的耦合过程，土壤湿度与边界层相互作用，边界层与自由大气相互作用，从而作用于气温降水等。为表达陆面过程对气候的影响，用陆-气耦合强度来表示陆面状态对大气的的影响程度[9]。陆-气耦合强度的定量表达，选择土壤湿度-温度相关系数，土壤湿度-降水相关系数。并分析相关系数与因子的散点图。

每个格点的土壤湿度分四季做30年平均画出土壤湿度的空间分布图。气温和降水空间分布图同理。用每个格点30年分四季土壤湿度和气温求二者相关系数，画出土壤湿度-气温相关系数空间分布图。土壤湿度-降水相关系数空间分布图同理。画出分四季土壤湿度-气温相关系数分别与土壤湿度和气温的散点图，相关系数做纵轴。画土壤湿度-降水相关系数做纵轴，土壤湿度和降水做横轴的散点图。

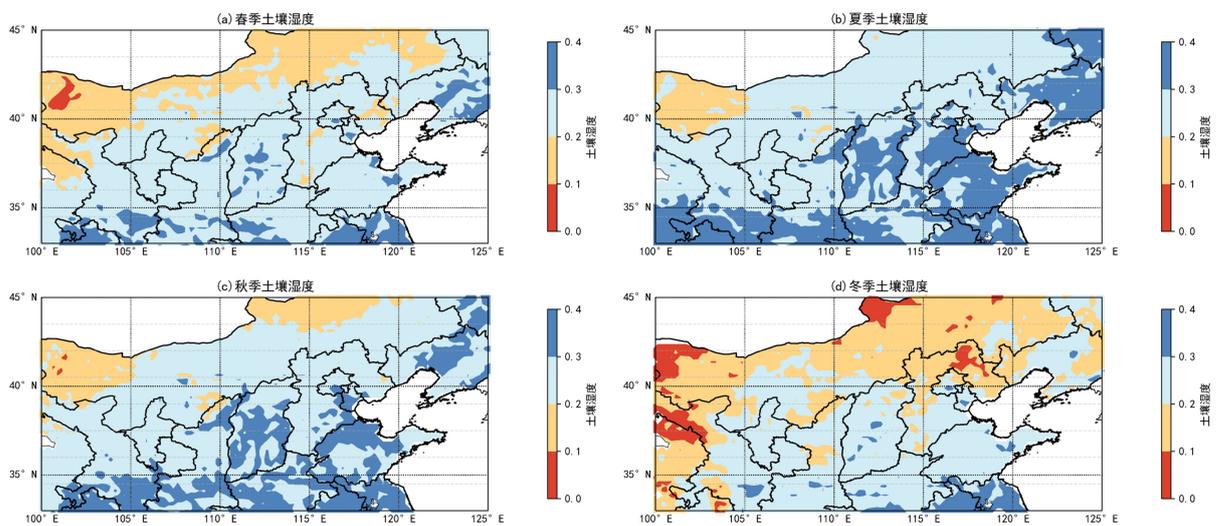
## 3. 我国北方地区土壤湿度、气温和降水特征

### 3.1. 土壤湿度的特征

图1为我国北方1982~2011年四季平均土壤湿度的空间分布。由图可见，土壤湿度在不同季节均表现为西北方向到东南方向增加，我国北方冬季相较于其他季节土壤湿度显著降低[11]。我国北方土壤湿度大于0，小于0.4，我国西北区土壤湿度较低，小于0.1，华北区和东北区土壤湿度相对较大。各季节土壤湿度最大的地区有东北区的东北平原，华北区，黄土高原区的黄河沿岸，太行山区。西北区土壤湿度很低

很稳定, 季节变化较小。整体而言夏季土壤湿度最大, 冬季最小。由北方冬季土壤湿度分布可见(图 1(d)), 西北区的土壤湿度最小, 为 0~0.1; 内蒙古高原区为 0.1~0.2; 华北区为 0.1~0.4; 黄土高原区为 0.1~0.3; 东北区为 0.1~0.3。在春季(图 1(a)), 区域土壤湿度比冬季增加了 0.1 左右。在夏季(图 1(b)), 西北区土壤湿度 0~0.3 之间; 内蒙古高原区为 0.1~0.3; 华北区为 0.2~0.4; 黄土高原为 0.2~0.4; 东北区为 0.2~0.4。秋季(图 1(c)), 区域土壤湿度相对夏季略有下降。干区域主要位于西北区、黄土高原区和内蒙古高原区, 华北区南部和东北区较湿润。整体上东南土壤湿度大, 西北土壤湿度小, 东南到西北土壤湿度递减, 冬季土壤湿度最小。

土壤湿度的大小由土壤特征, 植被, 气象要素等影响。不同因子影响程度不同, 在我国北方, 主要影响因子是气温和降水。降水可以与土壤直接进行水的交换, 气温会影响蒸散能量的供应, 进而影响水的相变。有研究表明, 在半干旱区, 土壤湿度与温度变化方向基本相反, 土壤湿度与降水变化方向基本相同[12]。

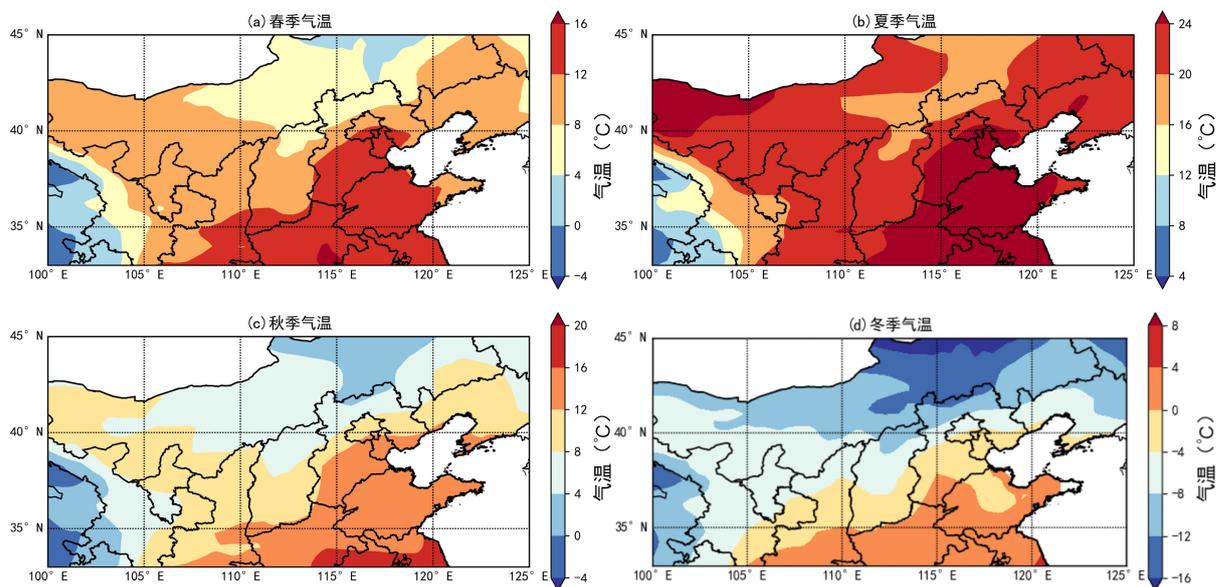


**Figure 1.** Spatial distribution of soil moisture in different seasons in northern China from 1982 to 2011. (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter

**图 1.** 1982~2011 年中国北方不同季节的土壤湿度空间分布。(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

### 3.2. 气温的特征

图 2 为 1982~2011 年我国北方四季平均气温的空间分布。由图可见, 整体上各季节均表现为气温从北到南增加[13]。从空间上看, 内蒙古高原区和东北区气温低, 华北区南部气温数值在北方相对大。气温与纬度分布大体相似, 北方地区基本是温带。越往南纬度越低, 接受的年太阳辐射总量越多, 季节均温就越高。最高气温有几个区域, 气温最高的地区有华北区南部, 西北区的沙漠地区。冬季气温在四季中最小。由冬季气温空间分布可见(图 2(d)), 内蒙古高原区季节均温最低, 为 $-16^{\circ}\text{C}$ 到 $-4^{\circ}\text{C}$ ; 西北区次之, 为 $-16^{\circ}\text{C}$ 到 $-4^{\circ}\text{C}$ ; 东北区, 为 $-16^{\circ}\text{C}$ 到 $0^{\circ}\text{C}$ ; 华北区为 $-12^{\circ}\text{C}$ 到 $8^{\circ}\text{C}$ ; 黄土高原区为 $-8^{\circ}\text{C}$ 到 $8^{\circ}\text{C}$ 。冬季气温最低的区域是西北区的青海和东北区。冬季气温最高的区域是华北区南部。由春季气温空间分布可见(图 2(a)), 除了西北区的青海部分区域气温低于 $0^{\circ}\text{C}$ , 其他区域气温大于 $0^{\circ}\text{C}$ 。春季最低气温出现在西北区的青海, 最低气温约为 $-4^{\circ}\text{C}$ 。春季最高气温出现在华北区南部, 最高气温为 $16^{\circ}\text{C}$ 。夏季(图 2(b)), 所有区域的气温最高, 几乎所有区域气温大于 $10^{\circ}\text{C}$ 。夏季最低气温为 $4^{\circ}\text{C}$ , 在西北区的青海。夏季最高气温为 $24^{\circ}\text{C}$ , 在华北区南部。秋季(图 2(c)), 相对夏季气温下降。秋季气温极小值出现在西北区的青海, 为 $-4^{\circ}\text{C}$ 。秋季气温极大值出现在华北区南部, 为 $20^{\circ}\text{C}$ 。

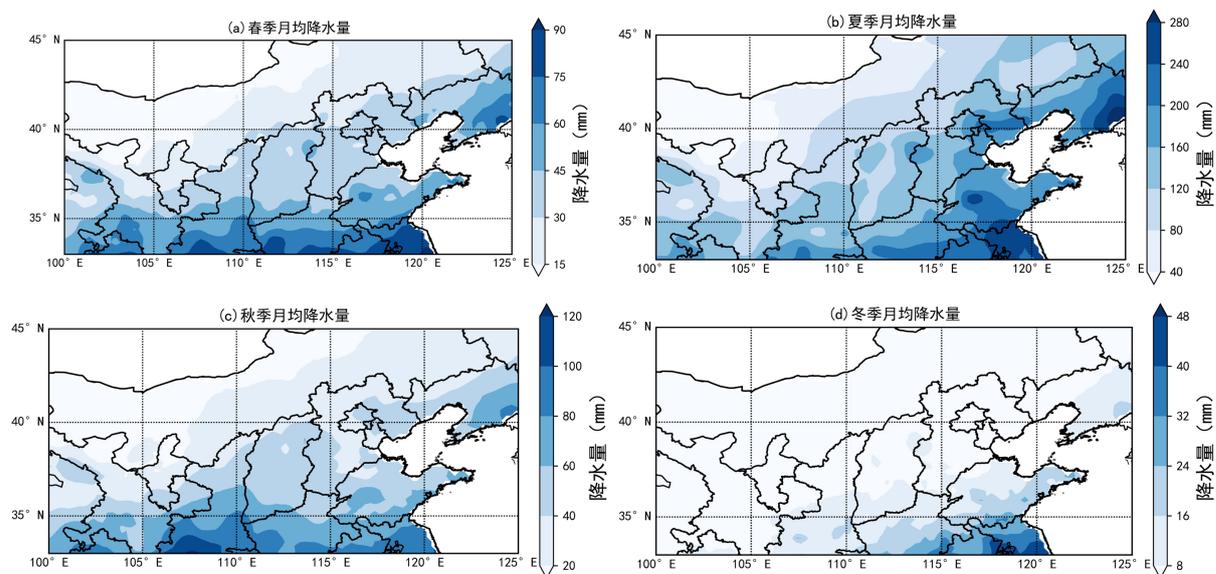


**Figure 2.** Spatial distribution of temperature in different seasons in northern China from 1982 to 2011. (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter

**图 2.** 1982~2011 年中国北方不同季节的气温空间分布。(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

### 3.3. 降水的特征

图 3 为我国北方 1982~2011 年四季月均降水量的空间分布。我国降水量大致从东南沿海到西北内陆逐渐变小, 越向西北内陆降水量减小地越快。我国处于亚欧大陆东部的位, 东侧是地球上最大的大洋太平洋, 海陆热容差异显著。由于我国所在的地理位置, 我国季风气候明显, 冬夏季风都很强[14]。降水来源主要是我国东侧的太平洋的水汽的输送。降水的空间分布由水汽来源决定, 等降水线基本与水汽输送方向垂直。我国面积大, 区域降水量差别大。东北区、华北区和黄土高原区黄河沿岸, 月均降水量大。



**Figure 3.** Spatial distribution of precipitation in different seasons in northern China from 1982 to 2011. (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter

**图 3.** 1982~2011 年中国北方不同季节的降水空间分布。(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

内蒙古高原区东部和黄土高原区西部,是半干旱区。西北区和内蒙古高原区西部,是干旱区。冬季(图 3(d)),内蒙古高原区、西北区和黄土高原区降水量很小,大约 8 mm 以下。冬季所有区域中华北区东南部降水量最大,为 48 mm。春季(图 3(a)),最低降水量在西北区和黄土高原区,为 15 mm。春季最高降水量在华北区南部和东北区,为 90 mm。夏季(图 3(b)),降水量最低区域是西北区和内蒙古高原区西部,为 40 mm。夏季降水量最高区域是华北区南部和东北区,为 280 mm。秋季(图 3(c)),降水量最小值出现在西北区和内蒙古高原区西部,为 20 mm。秋季降水量最大值出现在华北区南部,为 120 mm。降水集中在夏季,冬季降水量小。冬季盛行冬季风,西北气流强盛,基本所有地区冬季降水量小于夏季降水量。夏季盛行夏季风,季风带来了来自太平洋的水汽,水汽输送条件好。

## 4. 陆气耦合强度的时空分布特征

### 4.1. 土壤湿度 - 气温耦合强度的时空分布

我们用土壤湿度 - 气温相关系数表示土壤湿度 - 气温耦合强度,来直观地表示我国北方陆气作用的耦合强度,相关系数的正负表示正负耦合,相关系数的大小表示耦合强度的强弱。相关系数为正,土壤湿度和气温,变化趋势一致,表明土壤湿度和气温间的正耦合关系;相关系数为负,土壤湿度和气温,变化趋势相反,反映了土壤湿度和气温间的负耦合关系。土壤湿度和气温的相关系数的绝对值越大,土壤湿度和气温耦合越强;土壤湿度和气温的相关系数的绝对值越接近 0,二者耦合越弱。

由于气候环境条件的季节变化,土壤湿度 - 气温耦合强度具有明显的季节差异。图 4 为我国北方 1982~2011 年四季土壤湿度 - 气温的耦合强度的空间分布。由图可见,春季(图 4(a)),我国北方土壤湿度与气温除黄土高原区的甘肃中部和西北区的青海是正相关,其他区域均为负相关,负耦合较强的区域在北京、天津和廊坊一带,以及河北和山西交界部分区域。夏季(图 4(b)),耦合强度较春季增强很多,大部分区域表现为正耦合,北方中部及北部小部分地区仍为负耦合。正耦合强的区域位于西北区、华北区东部和东北区,而山西与河北交界处负耦合较强。秋季(图 4(c)),整个北方均表现为发展为正耦合,仅山西南部小部分地区为负耦合。正耦合较强的区域仍然位于西北区、华北区东部和东北区,但强度相较于夏季弱。冬季(图 4(d)),土壤湿度与气温耦合强度较秋季减弱,东北大部分地区转换为负耦合。正耦合较强区域位于山东、青海、甘肃和内蒙小部分地区,负耦合较强的区域位于辽宁东南部。

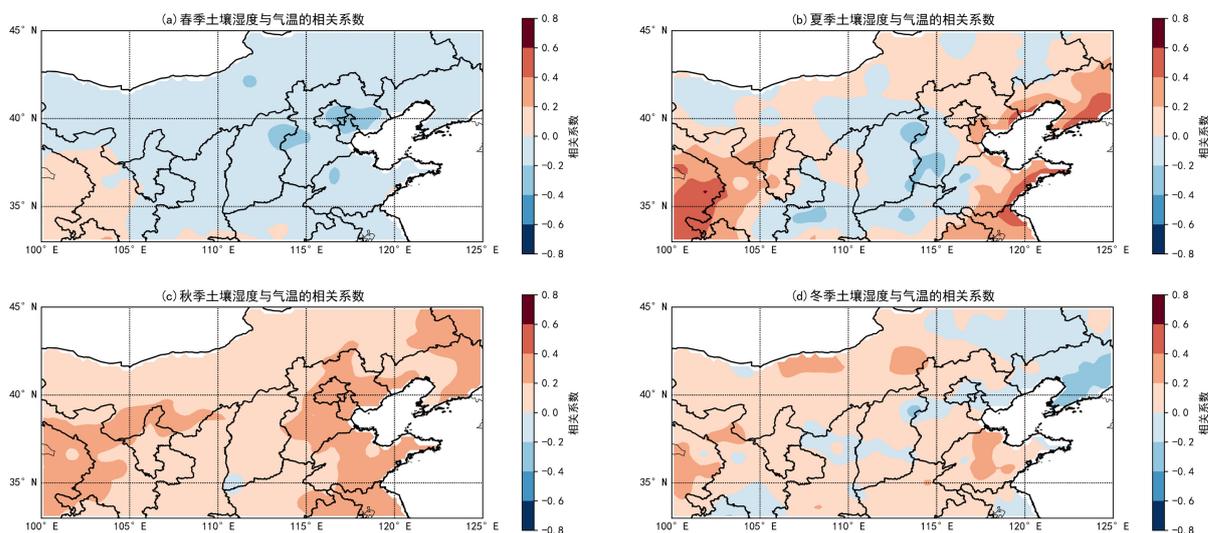
春季几乎都是负耦合强度。春季黄土高原区的甘肃中部和西北区的青海是正相关,其他区域是负相关。夏季,黄土高原区东部、华北区西部和内蒙古高原区部分区域是负相关。秋季,几乎所有区域是正耦合强度。冬季,几乎都是正相关,内蒙古高原区东部和东北区是负耦合强度,其他区域耦合强度为正。

从空间上看,正耦合强度大的区域为西北区、华北区东部和东北区,负耦合强度大的区域为华北区北部。春季,华北区北部是强的负耦合强度。夏季,整体相互作用强烈,整体耦合强度强,西北区、华北区东部和东北区土壤湿度 - 气温正耦合强度强,华北区北部为强的负耦合强度。秋季,西北区、华北区东部和东北区正耦合强烈,其他区域耦合弱。冬季,耦合强度绝对值基本很小,整体相互作用微弱,正耦合较强的区域在华北区东部和西北区。

我国北方春季绝大部分地区表现出土壤湿度 - 气温负耦合,土壤湿度 - 气温负相关可能是下面的原因。土壤湿度下降,引起潜热通量减少,在净辐射能基本不变的条件下,感热通量会变大,潜热输送与感热输送变化相反,感热通量是改变温度的热量交换,进而气温升高[15]。

夏秋冬季,大部分地区为正耦合。正耦合的原因可能如下。春季土壤湿度减小,潜热通量减少而感热通量增加,地表能量平衡改变影响边界层的结构,导致总云量减少,从而大气逆辐射减小,地表接受

的长波辐射减小，进而近地层气温减小。



**Figure 4.** Spatial distribution of soil moisture-air temperature correlation coefficients in different seasons in northern China from 1982 to 2011. (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter

**图 4.** 1982~2011 年中国北方不同季节的土壤湿度 - 气温的相关系数空间分布。(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

## 4.2. 土壤湿度 - 降水耦合强度的时空分布

用土壤湿度 - 降水相关系数表示土壤湿度 - 降水耦合强度，相关系数的正负表示正负耦合，相关系数的大小表示耦合强度的强弱。相关系数为正，土壤湿度和降水是正相关，变化方向一致；相关系数为负，土壤湿度和降水是负相关，变化方向相反。相关系数的绝对值越大，土壤湿度和降水耦合越强；相关系数的绝对值越接近 0，土壤湿度和降水耦合越弱，等于 0 二者相互作用非常弱。

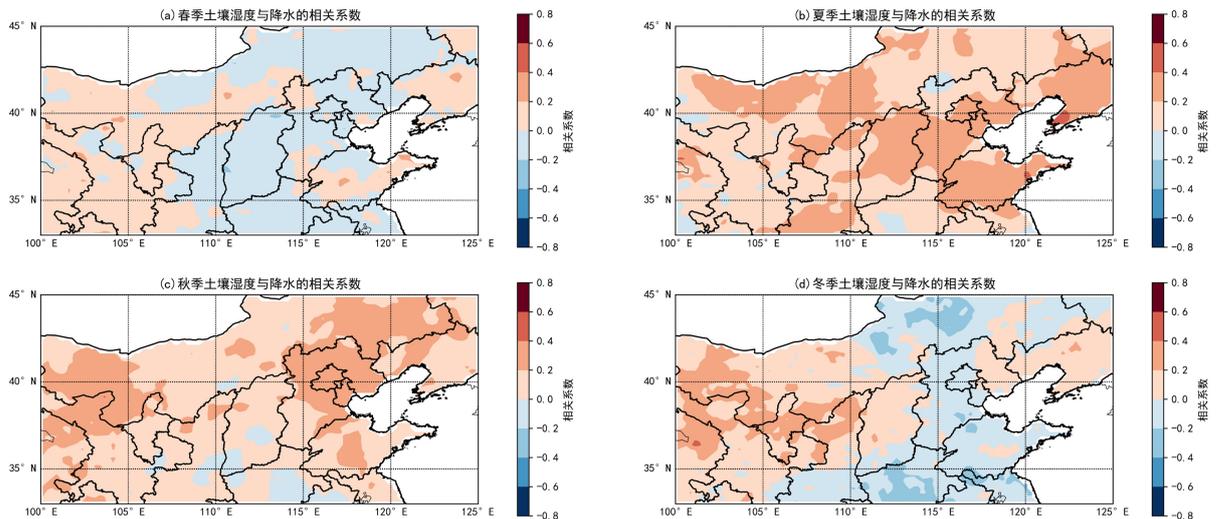
由于气候环境条件的季节变化，土壤湿度 - 降水耦合强度具有明显的季节差异。图 5 为我国北方 1982~2011 年四季土壤湿度 - 降水的耦合强度的空间分布。春季(图 5(a))，正耦合强度主要在西北区、东北区、内蒙古高原区西部、黄土高原区的宁夏和华北区的山东，其他区域为负耦合强度。春季，整体的耦合强度弱。夏季(图 5(b))，耦合强度比春季增强很多，几乎所有区域为正耦合，河北、河南、青海和内蒙古等地有零星的负耦合。正耦合强度大的区域为内蒙古中西部、陕西南部、山西、京津冀、山东和辽宁，这些区域土壤湿度与降水相互作用强烈。秋季(图 5(c))，几乎全部区域为正耦合强度，负耦合零散分布在甘肃、陕西、山西、内蒙古、河南和安徽等地。正耦合强度较大的区域为内蒙古东西部、甘肃青海北部、京津冀、山东中部和辽宁北部。秋季耦合强度比夏季耦合强度弱。冬季(图 5(d))，土壤湿度 - 降水耦合强度较秋季减弱。华北区、内蒙古高原区和陕西山西南部从正耦合转换为负耦合。正耦合强度较大的区域为西北区、内蒙古西部、宁夏和陕西北部，负耦合强度较大的区域为河南和内蒙古中部。

夏秋季几乎所有区域为正耦合强度，冬春季既有正耦合强度也有负耦合强度。春季，负耦合强度主要在内蒙古高原区东部和华北区，为负相关，其他区域数值为正，为正相关。夏季，几乎所有区域数值为正，基本所有区域土壤湿度和降水是正相关，除了部分小区域数值为负。秋季，除了一些分散的小区域数值为负，其他区域数值为正。冬季，内蒙古高原区东部和华北区为负数值，其他区域为正数值。

正耦合强度大的区域为华北区北部和内蒙古高原区西部，负耦合强度大的区域为华北区南部和内蒙

古高原区中部。春季，所有区域土壤湿度 - 降水相互作用弱。夏季，整体耦合强，正耦合强的区域位于内蒙古高原区中西部、黄土高原区东部、东北区和华北区。秋季，内蒙古高原区东西部、西北区和华北区北部正耦合强度强。冬季，整体耦合弱，正耦合强度大的区域位于西北区、内蒙古高原区西部和黄土高原区北部，负耦合强度大的区域位于华北区南部和内蒙古高原区中部。

土壤湿度 - 降水正负相关可能原因如下。若土壤湿度变大，水汽通量增大，蒸散到大气中的水汽增加，有利于降水，是正相关关系的可能原因[1]。负相关可能是土壤湿度减小，感热通量变大，边界层发展越旺盛，越易触发对流降水。



**Figure 5.** Spatial distribution of soil moisture-precipitation correlation coefficients in different seasons in northern China from 1982 to 2011. (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter

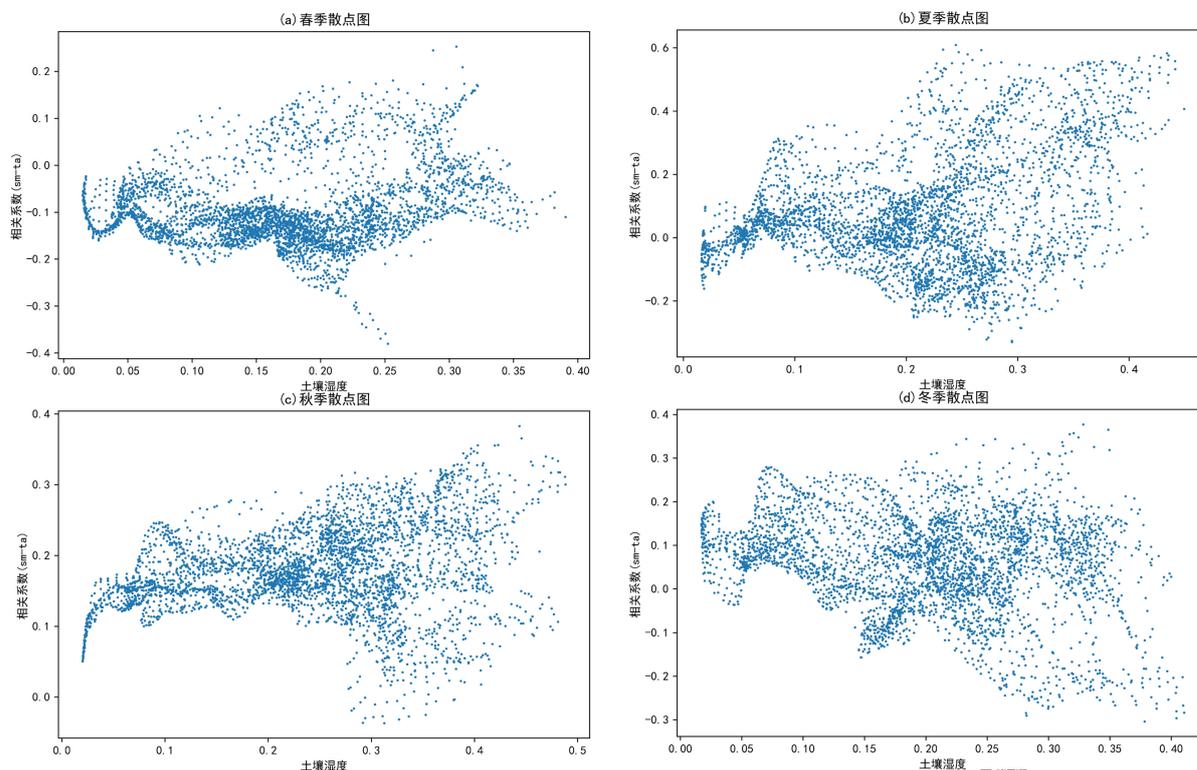
**图 5.** 1982~2011 年中国北方不同季节的土壤湿度 - 降水的相关系数空间分布。(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

陆 - 气相互作用夏季比冬季强。夏季季风强度大于冬季季风，夏季季风带来充足的水汽，夏季降水量大，降水对土壤湿度的影响大。冬季土壤湿度小，降水量小，气温低。冬季由于土壤湿度小和潜热小的原因，水汽蒸散小，陆 - 气相互作用弱。

## 5. 耦合强度随气象因子的变化

### 5.1. 土壤湿度 - 气温耦合强度随土壤湿度的变化

为了进一步探究耦合强度随气象因子的变化特征，图 6 给出了中国北方不同季节的土壤湿度 - 气温的耦合强度随土壤湿度的变化。由图可见，春季耦合强度主要大部分为负，当土壤湿度大于 0.2 时，随着土壤湿度的增大，负耦合强度减小；当土壤湿度小于 0.1 时，耦合强度大部分为负(图 6(a))。夏季，在土壤湿度小于 0.1 时，随着土壤湿度的增大，负耦合强度逐渐减小为 0。在土壤湿度 0 到 0.1 时，耦合强度基本为负；在土壤湿度 0.1 到 0.4 时，耦合强度有正有负(图 6(b))。整体而言夏季耦合强度的正值较多，绝对值大，相互作用强。秋季，当土壤湿度小于 0.3 时，随着土壤湿度的增大，正耦合强度增大；在土壤湿度大于 0.3 时，耦合强度随土壤湿度变化不明显。耦合强度在秋季大部分为正值(图 6(c))。冬季，在土壤湿度大于 0.05 小于 0.2 时，随着土壤湿度的增大，正耦合强度逐渐减小为 0。在土壤湿度小于 0.15 时，耦合强度为正；当土壤湿度不小于 0.15 时，存在正耦合强度和负耦合强度(图 6(d))。综合分析，当土壤湿度较小时，耦合强度的大小变化不大；当土壤湿度较大时，耦合强度的大小变化较大。



**Figure 6.** Variation of soil moisture-temperature coupling intensity with soil moisture in different seasons in northern China. (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter

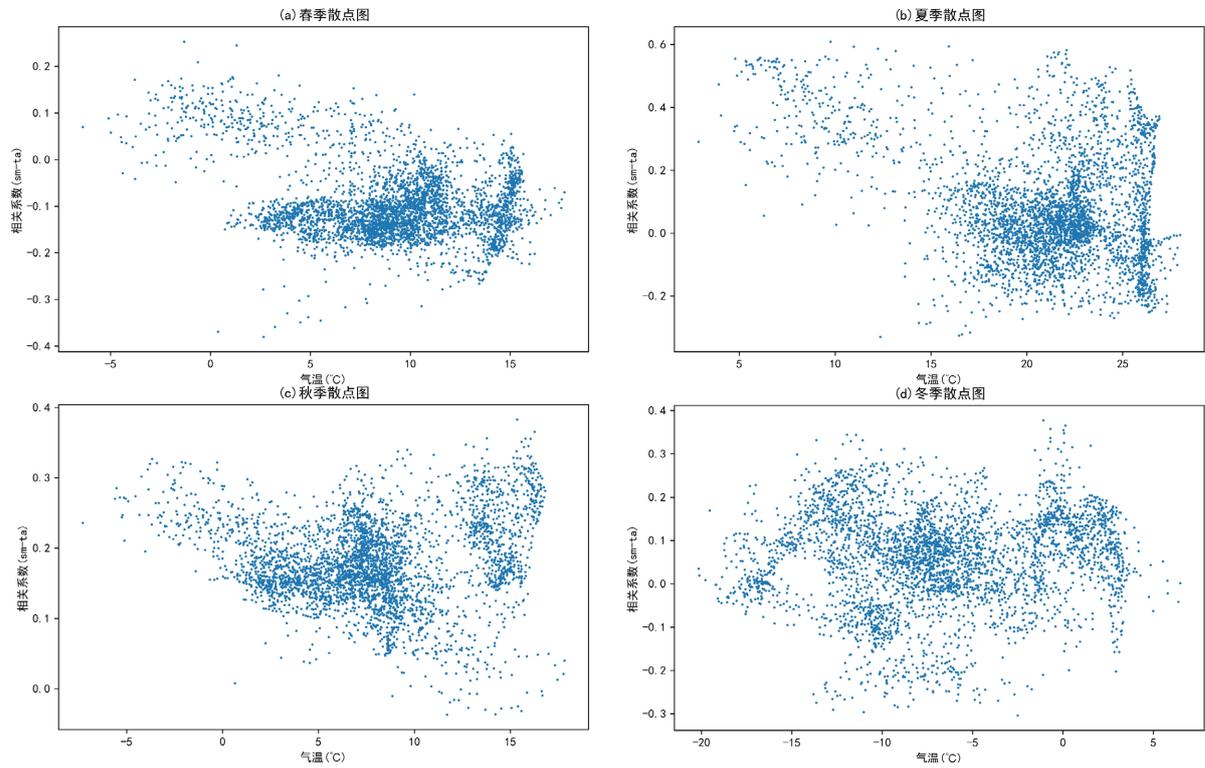
**图 6.** 中国北方不同季节的土壤湿度 - 气温的耦合强度随土壤湿度的变化。(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

## 5.2. 土壤湿度 - 气温耦合强度随气温的变化

图 7 给出了中国北方不同季节的土壤湿度 - 气温的耦合强度随地表气温的变化。由图可见,  $0^{\circ}\text{C}$  到  $15^{\circ}\text{C}$  为春季气温的主要温度, 气温  $0^{\circ}\text{C}$  以下时, 耦合强度大部分为正, 随着气温的升高, 正耦合强度逐渐减小; 在气温大于  $0^{\circ}\text{C}$  时, 耦合强度集中在  $-0.2$  到  $0$  之间, 随气温变化不明显(图 7(a))。夏季, 在气温小于  $15^{\circ}\text{C}$  时, 随着气温的升高, 正耦合强度减小, 逐渐接近  $0$ 。在气温小于  $15^{\circ}\text{C}$  时, 耦合强度基本为正; 在气温大于  $15^{\circ}\text{C}$  时, 既有正耦合强度也有负耦合强度(图 7(b))。秋季, 当气温小于  $10^{\circ}\text{C}$  时, 随着气温的升高, 正耦合强度减小; 而气温大于  $10^{\circ}\text{C}$  时, 正耦合强度变化不明显, 几乎所有散点为正耦合强度(图 7(c))。冬季, 耦合强度较为分散, 并且随气温的变化不明显(图 7(d))。综合分析, 当气温较低时, 随着气温的升高, 正耦合强度减小; 当气温较高时, 随着气温的升高, 耦合强度随气温变化不明显。在气温较低时, 存在强的正耦合强度; 在气温较高时, 存在强的负耦合强度。

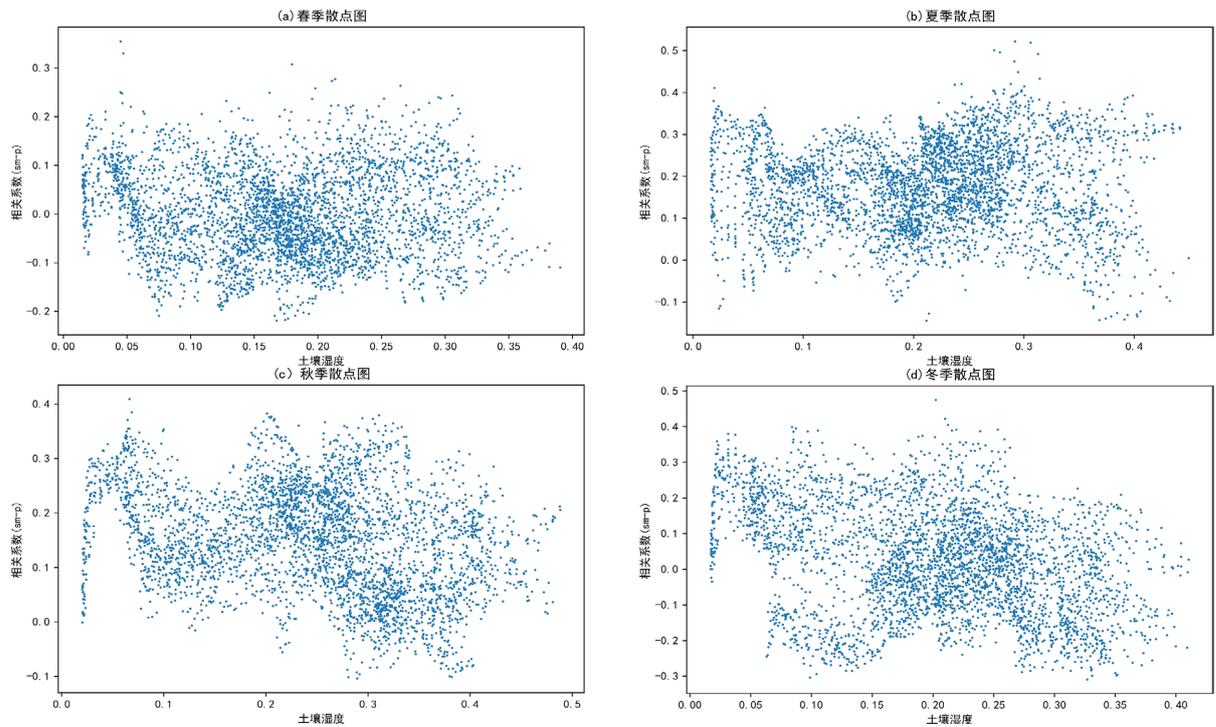
## 5.3. 土壤湿度 - 降水耦合强度随土壤湿度的变化

图 8 给出了中国北方不同季节的土壤湿度 - 降水的耦合强度随土壤湿度的变化, 整体而言二者相关较为分散。春季, 耦合强度有正有负, 相关系数主要集中在  $-0.2$  到  $0.2$  之间; 随着土壤湿度的增大, 耦合强度的值变化不大(图 8(a)), 春季整体耦合强度较弱。夏季, 耦合强度的值为正, 土壤湿度与降水呈显著正相关。夏季整体耦合强度强。在土壤湿度  $0$  到  $0.4$ , 耦合强度随土壤湿度变化不明显。在土壤湿度小于  $0.1$  和土壤湿度大于  $0.3$  时, 正耦合强度取最大值  $0.4$  (图 8(b))。秋季, 在土壤湿度  $0.1$  到  $0.2$  时, 随着土壤湿度的增大, 正耦合强度增大。在土壤湿度  $0$  到  $0.25$  时, 土壤湿度 - 降水是正相关; 在土壤湿度  $0.25$  到  $0.4$  时, 土壤湿度 - 降水耦合强度有正有负, 主要是正耦合强度(图 8(c))。冬季, 在土壤湿度大于  $0.25$  时,



**Figure 7.** Variation of soil moisture-temperature coupling intensity with air temperature in different seasons in northern China. (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter

**图 7.** 中国北方不同季节的土壤湿度 - 气温的耦合强度随气温的变化。(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季



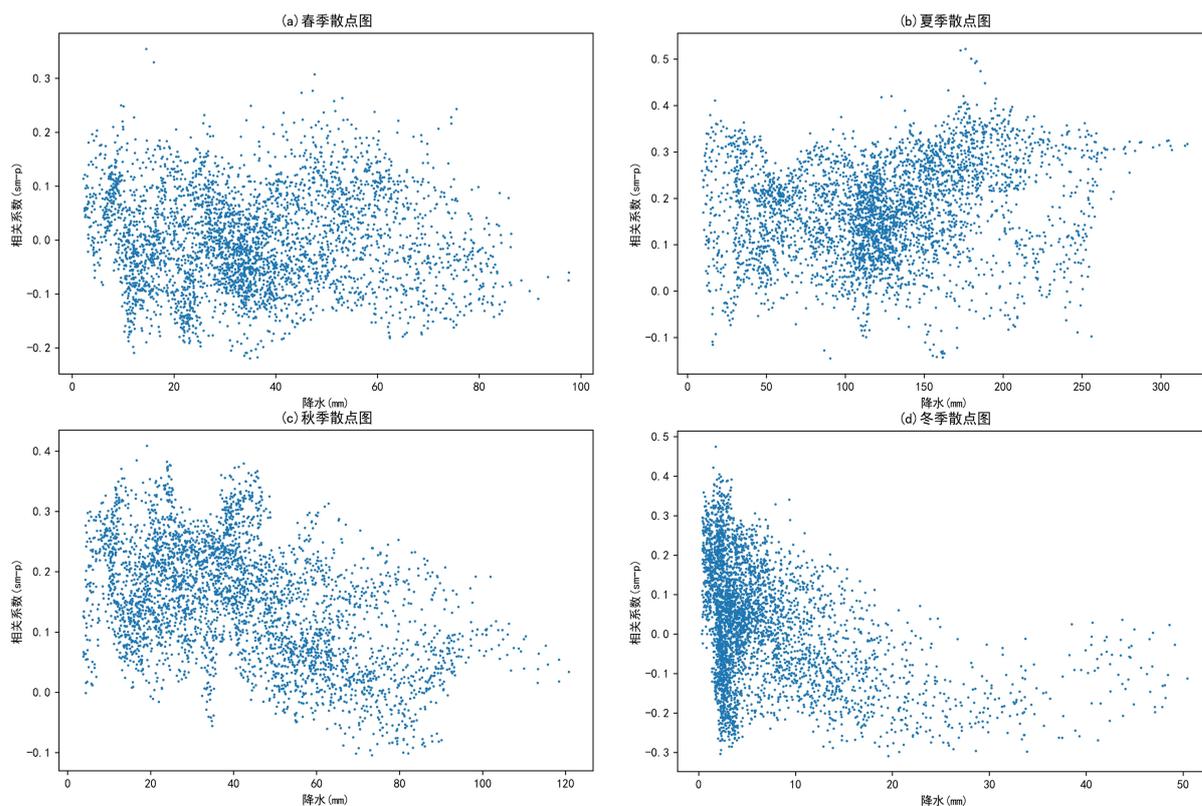
**Figure 8.** Variation of coupling intensity of soil moisture-precipitation with soil moisture in different seasons in northern China. (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter

**图 8.** 中国北方不同季节的土壤湿度 - 降水的耦合强度随土壤湿度的变化。(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

随着土壤湿度的增大，正耦合强度变为负耦合强度。在土壤湿度非常小，为 0 到 0.05 时，土壤湿度 - 降水是正相关，此时的耦合强度强。在土壤湿度小于 0.05 时，为正耦合强度；在土壤湿度大于 0.05 时，为正或负耦合强度(图 8(d))。综合分析，整体而言土壤湿度 - 降水的耦合强度较为分散，夏秋季耦合强度主要为正，冬春季既有正耦合强度又有负耦合强度。

#### 5.4. 土壤湿度 - 降水耦合强度随降水的变化

图 9 给出了中国北方不同季节的土壤湿度 - 降水的耦合强度随降水的变化。春季，整体上，耦合强度集中于-0.2 到 0.2 之间，并且随着降水的增大，耦合强度的大小基本不变(图 9(a))。夏季，耦合强度大于 0，并且随着降水量的增大，耦合强度变化不明显。散点主要分布在耦合强度 0 到 0.4 范围内，土壤湿度 - 降水是正相关，在降水量小或大的区域，存在小部分散点为负耦合强度(图 9(b))。秋季，整体而言耦合强度大于 0，在降水量大于 40 mm 时，随着降水量的增大，正耦合强度逐渐减小。在降水 0 mm 到 40 mm 时，为大的正耦合强度，耦合强度最大为 0.3。在降水 60 mm 以上时，为负耦合强度。在降水 60 mm 到 80 mm 时，存在散点耦合强度为 0，土壤湿度 - 降水相互作用从正耦合过渡为负耦合(图 9(c))。冬季，我国北方降水偏少，季节平均降水量集中在 0 到 10 mm，在降水量大于 10 mm 时，随着降水量的增大，负耦合强度增大。在降水量 0 mm 到 10 mm 时，既有正耦合强度也有负耦合强度。在降水大于 10 mm 时，耦合强度基本为负值，土壤湿度 - 降水负相关(图 9(d))。综合分析，夏秋季几乎都是正耦合强度，冬春季存在正耦合和负耦合。正耦合最强的区域是降水量较小的区域，负耦合最强的区域是降水量较小和较大的区域。



**Figure 9.** Variation of soil moisture-precipitation coupling intensity with precipitation in different seasons in northern China. (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter

**图 9.** 中国北方不同季节的土壤湿度 - 降水的耦合强度随降水的变化。(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季

## 6. 结论与讨论

本文利用我国北方地区陆面土壤湿度、气温及降水数据，以相关系数为耦合强度指标，诊断分析了我国北方陆-气耦合强度的时空分布及其与空间水热条件的关系，得到结论如下：

1) 整体而言在我国北方地区土壤湿度和降水从西北方向到东南方向逐渐增大。东部季风很难将水汽带到我国西北[16]，我国西北降水量小，土壤湿度小，蒸散弱。由于接受的太阳辐射逐渐变大，我国北方地区气温整体上从北到南增加。

2) 在西北区、华北区东部和东北区，土壤湿度-气温正耦合强度大。在华北区北部，土壤湿度-气温负耦合强度大[17]。我国北方地区春季几乎都是负耦合，夏秋冬季主要是正耦合。在华北区北部和内蒙古高原区西部，土壤湿度-降水正耦合强度大。在华北区南部和内蒙古高原区中部，土壤湿度-降水负耦合强度大。夏秋季几乎都是正耦合。我国北方陆-气耦合强度季节差异明显。陆-气耦合夏季强于冬季。冬季由于土壤湿度小和潜热小的原因，水汽蒸散弱，陆-气耦合弱。由于水汽和能量等原因，夏季陆-气相互作用强于冬季。

3) 土壤湿度-气温耦合强度在土壤湿度 0.3 到 0.4 时，存在强的正耦合和强的负耦合。土壤湿度-气温耦合强度在气温较低时，存在强的正耦合；在气温较高时，存在强的负耦合。土壤湿度-降水耦合强度随着土壤湿度的增大，变化不明显。土壤湿度-降水耦合强度在降水量较小的区域时，存在强的正耦合和负耦合；在降水量较大的区域时，存在强的负耦合。

本文的不足之处在于，利用陆面过程模型得到的土壤湿度的资料，可能与实际土壤湿度存在误差。陆-气耦合由一系列陆面、陆面和边界层、边界层和自由大气间过程组成，且陆-气相互作用非线性，强度难以量化。此外，极端值对相关系数有较大影响，可能导致分析和结论不准确，需要今后的研究进行进一步的精细评估。

## 参考文献

- [1] 杨扬, 杨启东, 王芝兰, 高璐. 中国区域陆气耦合强度的时空分布特征[J]. 干旱气象, 2021, 39(3): 374-385.
- [2] 汪薇, 张琪. 陆面过程模式的研究进展简介[J]. 气象与减灾研究, 2010, 33(3): 1-6.
- [3] Misra, V. (2020) Land-Atmosphere Interactions. In: *Regionalizing Global Climate Variations*, Elsevier, Amsterdam, 17-46. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821826-6.00002-3>
- [4] 程善俊, 黄建平, 季明霞, 管晓丹, 郭瑞霞. 中国华北暖季土壤湿度的变化特征[J]. 干旱气象, 2015, 33(5): 723-731.
- [5] 蒋晓武. 气候变暖背景下北半球陆面过程响应特征预估分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [6] Santanello Jr., J.A., Dirmeyer, P.A., Ferguson, C.R., Findell, K.L., Tawfik, A.B., Berg, A., Ek, M., Gentine, P., Guillod, B.P., van Heerwaarden, C., Roundy, J. and Wulfmeyer, V. (2018) Volker. Land-Atmosphere Interactions: The LoCo Perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **99**, 1253-1272. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0001.1>
- [7] 苑广辉. 中国干旱半干旱区陆气相互作用及其对区域气候的影响[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [8] Li, M.X., Ma, Z.G., Gu, H.P., Yang, Q. and Zheng, Z.Y. (2017) Production of a Combined Land Surface Data Set and Its Use to Assess Land-Atmosphere Coupling in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **122**, 948-965. <https://doi.org/10.1002/2016JD025511>
- [9] Seneviratne, S.I., Corti, T., Davin, E.L., Hirschi, M., Jaeger, E.B., Lehner, I., Orlowsky, B. and Teuling, A.J. (2010) Investigating Soil Moisture-Climate Interactions in a Changing Climate: A Review. *Earth-Science Reviews*, **99**, 125-161. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>
- [10] 陈海山, 孙照渤. 陆气相互作用及陆面模式的研究进展[J]. 南京气象学院学报, 2002(2): 277-288. <https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.2002.02.021>
- [11] 刘丽伟, 魏栋, 王小巍, 程善俊. 多种土壤湿度资料在中国地区的对比分析[J]. 干旱气象, 2019, 37(1): 40-47.

- 
- [12] 程善俊, 管晓丹, 黄建平, 季明霞. 利用 GLDAS 资料分析黄土高原半干旱区土壤湿度对气候变化的响应[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 641-649.
- [13] 姜惠玲. 浅谈地理和地形影响下的我国区域气温空间分布情况[J]. 北京农业, 2011(18): 140-141.
- [14] 冯新灵, 罗隆诚. 全球变化背景下中国未来汛期旱涝灾预测[J]. 资源科学, 2006(5): 81-87.
- [15] Li, K., Zhang, J. and Wu, L. (2018) Assessment of Soil Moisture-Temperature Feedbacks with the CCSM-WRF Model System over East Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **123**, 6822-6839. <https://doi.org/10.1029/2017JD028202>
- [16] 黄荣辉, 陈际龙. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异[J]. 大气科学, 2010, 34(6): 1035-1045.
- [17] Wei, J.F. and Dirmeyer, P.A. (2012) Dissecting Soil Moisture-Precipitation Coupling: Soil Moisture-Precipitation Coupling. *Geophysical Research Letters*, **39**, L19711. <https://doi.org/10.1029/2012GL053038>