
* 试 *
* 验 *
* 研 *
* 究 *

新疆维吾尔自治区 1981—2018 年 降雨侵蚀力的空间变化特征

伊力哈木·伊马木

(新疆维吾尔自治区水土保持生态环境监测总站, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: [目的] 分析 1981—2018 年新疆维吾尔自治区降雨侵蚀力空间变化特征, 为该区土壤水力侵蚀理论研究和开展水土保持相关实践工作提供科学参考。[方法] 以 1981—2018 年新疆 38 个气象站的逐日降雨资料为基础, 采用半月降雨侵蚀力算法模型计算降雨侵蚀力因子 R , 进而反映降雨对土壤侵蚀的内在作用, 并采用倾向率和 Kriging 插值方法分析新疆降雨侵蚀力的空间变化特征。[结果] ① 新疆多年平均降雨侵蚀力和降雨量空间格局相似, 呈西高东低, 中部高南北低的格局。近 40 a 新疆年降雨侵蚀力总体上处于波动增加趋势, 其平均增速为 $15.6 [MJ \cdot mm / (hm^2 \cdot h \cdot a)] / 10 a$, 但因区域不同而有差异, 其倾向率天山北部多呈正值, 南部多为负值或持平, 且北部高于南部。② 降雨侵蚀力最大倾向率多出现在夏季 (6—8 月), 但不同区域四季分配格局不同, 北部大部分区域春、夏季较高, 南部大部分区域夏、秋季较高, 多年平均降雨侵蚀力年内分配呈集中在“春夏”格局, 但不同区域集中程度不同, 其年内集中程度均为降雨侵蚀力高于降雨量, 说明能够产生土壤侵蚀的大降雨事件多出现在 5—8 月。[结论] 气候和海拔高度是影响降雨侵蚀力格局的关键要素, 在气候变化背景下, 春夏季的大降水事件对新疆天山山区土壤水力侵蚀不容忽视。

关键词: 降雨侵蚀力; 日降雨量; 空间变化; 新疆维吾尔自治区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)04-0001-09

中图分类号: S157.1, TV125

文献参数: 伊力哈木·伊马木. 新疆维吾尔自治区 1981—2018 年降雨侵蚀力的空间变化特征[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 1-9. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.04.001; Yilihamu·Yimamu. Spatial variation of rainfall erosivity in Xinjiang Uygur Autonomous Region from 1981 to 2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 1-9.

Spatial Variation of Rainfall Erosivity in Xinjiang Uygur Autonomous Region from 1981 to 2018

Yilihamu·Yimamu

(General Station of Soil and Water Conservation and

Ecological Environment Monitoring of Xinjiang, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: [Objective] The spatial variation characteristics of rainfall erosivity in Xinjiang Uygur Autonomous Region from 1981 to 2018 were analyzed in order to provide a scientific reference for the theoretical study of soil hydraulic erosion, and for the practical work related to soil and water conservation in the region. [Methods] Based on the daily rainfall data of 38 meteorological stations in Xinjiang region from 1981 to 2018, the half-month rainfall erosion algorithm model was used to calculate the rainfall erosivity factor R , which reflected the intrinsic effect of rainfall on soil erosion. The ratios of multi-year average half monthly rainfall erosivity were calculated, and Kriging interpolation method was used to analyze the spatial variation characteristics of rainfall erosion in Xinjiang region. [Results] ① The spatial variation of rainfall erosivity was similar with the spatial variation of precipitation in Xinjiang region, showing a pattern of higher in the west and lower in the east, higher in the middle and lower in the south and north. As a whole, the annual rainfall erosivity showed an increasing trend with a growth rate of $15.6 [MJ \cdot mm / (hm^2 \cdot h \cdot a)] / 10 a$, although it varied among

收稿日期: 2020-04-24

修回日期: 2020-05-31

资助项目: 新疆维吾尔自治区财政专项“天山北坡典型区水土流失与经济发展关系研究”(213031002)

第一作者: 伊力哈木·伊马木(1969—), 男(维吾尔族), 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人, 博士, 高级工程师, 主要从事水土保持及水利工程相关研究。Email: 949941638@qq.com.

regions. The trend rate was positive in most areas of the Northern Tianshan while negative or zero in most areas of the Southern Tianshan, and which was higher in the northern part than in the southern part. ② Higher trend rate of rainfall erosivity appeared mostly in summer (from June to August), however the seasonal distribution pattern was different in various regions. The higher tendency rate occurred in spring and summer across most of the north part, meanwhile it occurred in summer and autumn across most of the south part. The distribution of multi-year average rainfall erosivity concentrated in spring and summer, but different in various regions. The distribution of rainfall erosivity was more concentrated than rainfall. These indicated that the erosive rainfall events mostly occurred from May to August. [Conclusion] Climate and altitude are key factors affecting the patterns of rainfall erosivity. In the context of climate change, the heavy rainfall events in spring and summer should not be ignored for soil hydraulic erosion in Tianshan Mountain of Xinjiang region.

Keywords: rainfall erosivity; daily rainfall; spatial variation; Xinjiang Uygur Autonomous Region

土壤侵蚀是我国最严重的生态环境问题之一^[1]。雨滴击溅和降雨产生径流形成的降雨侵蚀力,是土壤侵蚀的主要动力^[1-2]。在中国坡面土壤流失方程 CSLE(chinese soil loss equation)^[3]等众多土壤流失方程中用降雨侵蚀力(rainfall erosivity)表示降雨因素,可见降雨侵蚀力因子至关重要,其对土壤侵蚀定量研究和揭示气候变化对土壤侵蚀影响有重要意义^[2]。降雨侵蚀力因子作为评估潜在降雨侵蚀能力的动态指标,与月雨量及年雨量相比,日雨量包含更详细的降雨特征信息,且较为符合降雨侵蚀力计算要求、估算精度较可靠,因而得到普遍应用^[4-7]。国内外学者在降雨侵蚀研究中取得了许多成就,主要体现在两点:①对降雨侵蚀力估算方法的研究,包括基于 $E \cdot I$ 结构计算方法^[8]和基于常规气象资料的简易计算方法 2 类。基于不同时间尺度的降雨数据,许多学者利用常规气象资料建立了基于日降雨量^[6,9],月降雨量^[9-10]年降雨量^[11-12]来估算降雨侵蚀力^[13-15]。因此,诸多学者^[16-17]提出基于日降雨量的多种估算模型^[18],其中幂函数型模型应用最为普遍^[19]。②降雨侵蚀力变化特征研究。多在不同的时间尺度和空间尺度展开研究。如国内学者在全国尺度上,章文波^[5],刘斌涛^[20]等利用日降水数据,结合线性倾向率指标,分析了全国降雨侵蚀力空间变化情况,进而确定我国降雨侵蚀力变化显著区域。省域尺度上,马良等^[21]采用降雨数据分析了江西省 1957—2008 年降雨侵蚀力的时空变化特征,刘燕玲^[22]对黑龙江省降雨侵蚀力开展了研究,得出的结论是该省降雨侵蚀力自西北向中南升高,东部低于中部,空间分布特征与年降雨量空间分布吻合;流域尺度上,刘春利等^[23]学者探讨分析了延河流域降雨侵蚀力时空变化特征,结论为该流域降雨侵蚀力与侵蚀性降雨空间分布相一致,降雨侵蚀力总体上呈下降的趋势;时间尺度上,赖

成光^[24]根据 1960—2012 年的日降雨资料数据,从年、季节、汛期和非汛期的角度对珠江流域降雨侵蚀力变化特征进行研究,得出流域多年平均降雨量和年均降雨侵蚀力之间具有较强相关性;Huang^[25]等使用日值降雨资料数据研究了长江流域 1960—2005 年的降雨侵蚀力时空变化,得出其趋势在空间上表现出金沙江和鄱阳湖流域显著上升,在时间尺度上则表现出夏冬季节呈显著增加。综上所述,目前国内已有研究主要集中在水土流失典型区,如南方地区^[26-28]和黄土高原区^[29-30],但关于干旱区研究较少,特别是缺乏关于新疆维吾尔自治区长时间、整体性的综合分析。近年来在气候变化背景下,西北干旱区气候变化较为显著,降雨处于增加趋势,同时由于新疆地形原因,造成降雨空间异质性^[31]较大。因此,开展降雨侵蚀力变化研究在掌握干旱区降雨侵蚀力的变化特征,对区域土壤水力侵蚀的防治有着重要意义。逐日降雨量数据是目前我国面向公众公开的气象站点数据中最详细的雨量整编数据。鉴于很难获取有关次降雨过程数据,同时为达到精确估算降雨侵蚀力的目的,本文以新疆 1981—2018 年 38 个气象站日降雨资料为基础,利用日降雨侵蚀力模型计算了其降雨侵蚀力,分析近 40 a 来新疆降雨侵蚀力的时空变化特征,探讨新疆降雨侵蚀力时空分布格局的影响因素,旨在更好地了解气候变化背景下该区土壤水力侵蚀关键自然因素动态变化趋势,为该区土壤水力侵蚀理论研究和开展水土保持相关实践工作等提供科学参考。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区处于中国西北部,为欧亚大陆中心(34°—50°N,73°—97°E),面积约 1.60×10^6 km²,为典型的温带大陆型干旱气候,年平均气温 10 ℃,降水稀少且时空差异显著,年均降水约 145 mm。降水

在空间上呈现西北高东南低,中四周低的特征,时间上主要集中夏季,并呈现出逐年增加的趋势^[32]。地形以盆地和山地为主,呈现三山夹两盆的地形轮廓,天山山脉横贯中部,将新疆分为北部、南部和东部。区内地表景观以山体—绿洲—荒漠为主,沙漠戈壁和裸地面积大^[33],植被主要以灌木、半灌木为主,山区有少量森林和草原^[34]。区内土壤类型多样,以风沙土、棕钙土、寒冻土为主,存在普遍的盐渍化和贫瘠化问题^[35]。

1.2 资料收集和预处理

收集新疆 52 个气象站点 1981—2018 年的逐日降雨数据(来源于中国气象数据共享服务网: <http://www.nmic.cn/>)。针对部分气象站点存在缺漏测的情况,故对气象站点数据资料进行核实,去除年均缺测日数超过 5% 的气象站点,进而确定出新疆 38 个有效气象站点,继续对其仍存在少量缺测的数据进行统计,发现约 90% 处于少雨的 4 个月份(11—12 月, 1—2 月),则此部分少量的缺测数据对本研究影响较小。最后,对 38 个有效测站中剩余月份即影响较大月份的缺测数据,以距离倒数为权重、利用最近相邻 3 个测站的数据进行空间插值,得到完整的逐日降雨序列数据。为了对新疆降雨侵蚀力空间特征进一步分析,对新疆区域进行分区域统计分析。依据天山以北、以南和以东 3 部分地区的划分标准^[36],按照新疆气象站点的海拔高度,将新疆划分为平原区(<1 000 m)和山区(≥1 000 m)。除了计算年降雨侵蚀力外,按照春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月至次年 1—2 月)四季划分标准,计算对应季节的降雨侵蚀力。

1.3 降雨侵蚀力计算

日雨量模型可直接估算年内各个半月的降雨侵蚀力,可用于深入分析降雨侵蚀力的年内和年际变化,具有月、年雨量模型无法相比的优势。因此,本研究使用日雨量算法模型估算半月降雨侵蚀力^[5],计算表达式为:

$$R_{\text{半月}k} = \alpha \sum_{k=1}^m (P_k)^\beta \quad (1)$$

式中: $R_{\text{半月}k}$ 为第 k 个半月时段的降雨侵蚀力 R 值 [$\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$]; m 为半月时段天数(d); P_k 为半月内第 k 天的侵蚀性日雨量值(≥12 mm), <12 mm 以 0 计算(mm); 以每月第 15 日划分半月时段,前 15 d 为一个半月时段,剩余天数作为下一半月时段,这样将全年依次划分为 24 个时段; α 、 β 为模型参数。

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (2)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (3)$$

式中: P_{d12} 为日雨量 ≥12 mm 的日平均雨量(mm); P_{y12} 为日雨量 ≥12 mm 的年平均雨量(mm)。采用公式(2—3)计算逐年 24 个半月降雨侵蚀力,将计算出的各半月降雨侵蚀力累加得到年降雨侵蚀力。

采用新疆 38 个气象站点日降雨数据,计算出每个站点多年平均降雨侵蚀力。

1.4 倾向率

倾向率表征气候要素长期变化的方向与程度,本文采用倾向率表明降雨侵蚀力的年际变化趋势^[19,23],其计算公式为^[37]:

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(i - \bar{i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 (i - \bar{i})^2}}, \quad k = r_{xt} \frac{\sigma_x}{\sigma_i} \quad (4)$$

式中: r_{xt} 为趋势系数; n 为年序号; X_i 为第 i 年降雨侵蚀力; \bar{X} 为样本均值; $\bar{i} = (n+1)/2$ 。当趋势系数 r_{xt} 为正时,则降雨侵蚀力为线性增加趋势,反之则为线性减少; σ_x 为要素 x 的均方差; σ_i 为数列 1 到 n 的均方差, $k \times 10$ 为气候倾向率(某要素单位/10 a),则可以以趋势系数 r_{xt} 计算气候倾向率^[37]。值的正负可表征上升或者下降趋势,值为负时,表明时段内呈下降趋势;值为正时,表明时段内呈上升趋势。

2 结果与分析

2.1 多年平均降雨量与降雨侵蚀力空间格局

根据新疆 1981—2018 年的降雨量数据的日降雨数据计算各年份的年平均降雨量,采用使用 ArcGIS 软件的 Kriging 插值得到新疆平均降雨量空间分布和年均降雨侵蚀力空间分布图(见图 1)。由图 1 可看出,年均降雨量最高的地区为昭苏,达到 509.56 mm,年均降雨量最低为吐鲁番,为 15.10 mm,较为明显站点从强到弱排序有昭苏、乌鲁木齐牧试、乌鲁木齐、伊宁、塔城和巴音布鲁克。年均降雨量在空间差异明显,呈现北高于南,西高于东,中部高,南北低,即天山山区高,而其他低的特征。由新疆年均降雨侵蚀力空间分布图分析新疆 1981—2018 年降雨侵蚀力的空间分异,新疆各站点降雨年均侵蚀力 R 值的变化范围为 1.78 ~ 629.49 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,年均降雨侵蚀力 R 值最大站点在昭苏,最小值在吐鲁番;其中 5 个站点多年平均降雨侵蚀力 $R > 300 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,较明显站点由强到弱是昭苏、乌鲁木齐牧试、乌鲁木齐、阿合奇、巴里坤地区,可以看出,多年平均降雨侵蚀力空间分布规律与降水量的空间分布规律基本吻合。

近40 a间,天山北部降雨侵蚀力最大值在伊宁市。为 $1\,391.62\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,其余地区为 $28.73\sim 1\,302.19\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 。天山南部最大值地区为阿合奇县,达到了 $1\,239.41\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,其余地区为 $28.73\sim 1\,018.76\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ 。年均降雨侵蚀力空间差异

明显,呈中部高,南北低,既天山山区高,其他区域低的特征。这可能由于该地区侵蚀性降雨强度和发生频率较高的原因导致,尽管其他各县年均侵蚀性降雨量显著小于昭苏,特别是在山区,这表明地形和降雨量是区域降雨侵蚀力的重要影响因素,对空间分布具有显著影响。

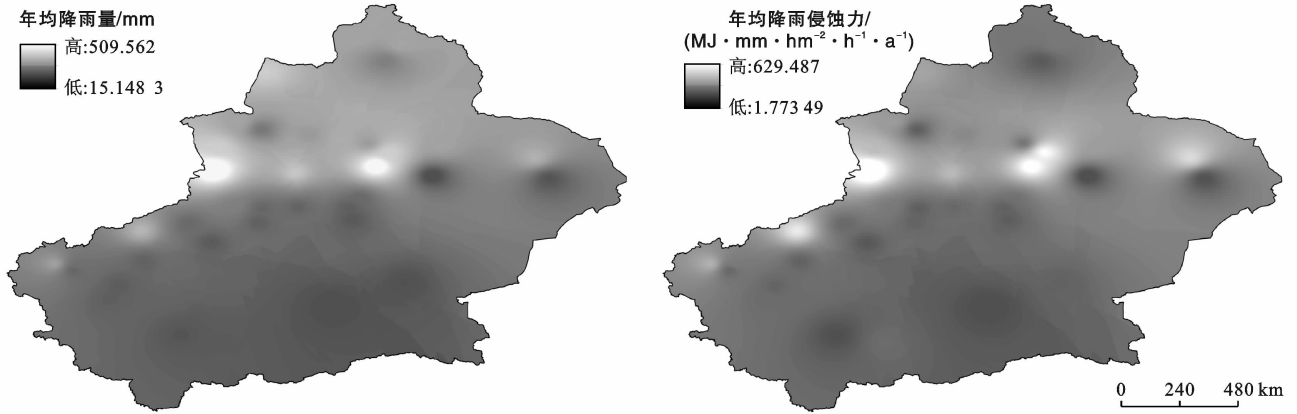


图1 新疆1981—2018年年均降雨量和降雨侵蚀力空间分布

2.2 降雨量与降雨侵蚀力年际变化空间分异

由新疆降雨量与降雨侵蚀力年际变化趋势图(见图2)可以看出,降雨侵蚀力与降雨量时间格局与趋势基本趋于一致。

降雨量呈波动式增加趋势,增速为 $9.00\text{ mm}/10\text{ a}$ 。1981—2018年全疆年均降雨量最高为 215.86 mm ,最低为 101.23 mm ;而1981—2018年年均降雨侵

蚀力总体呈增加趋势,增速为 $15.60\text{ [MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})]/10\text{ a}$,但降雨侵蚀力年际波动幅度较大。由于年均降雨侵蚀力空间差异明显,所以全疆年平均不高,为 $158.81\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,最高为 $288.58\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,最低为 $84.11\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$,但年际平均降雨侵蚀力波动幅度较大。

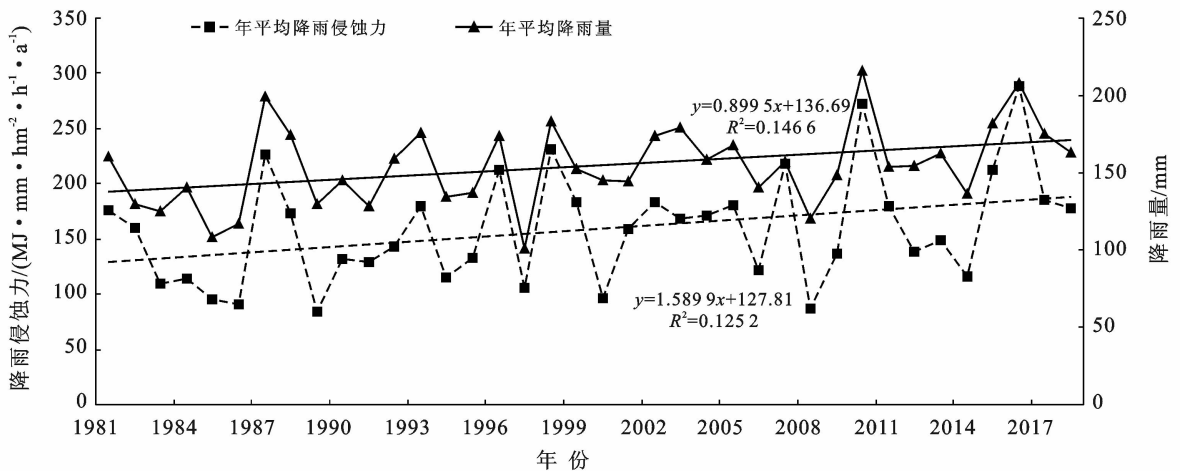


图2 新疆1981—2018年年均降雨量与降雨年均侵蚀力年际变化

将新疆每个站点的降雨侵蚀力1981—2018年际降雨侵蚀力变化倾向率进行对比(见图3),总体新疆大部分地区降雨侵蚀力呈现增加趋势,少部分地区降雨侵蚀力呈减少趋势,个别地区趋于稳定。乌鲁木齐

牧试站、阿合奇站、乌鲁木齐站等24个地区气象站数据显示降雨侵蚀力变化呈现不同程度的正(增加)趋势;沙雅、焉耆、若羌等14个地区气象站数据显示降雨侵蚀力变化呈现负(减少)趋势。总体上天山以北的地

区降雨侵蚀力波动范围年际变化倾向率为 $-5.3 \sim 103.4$ $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]/10 \text{ a}$, 高于天山以南地区 $-29.8 \sim 71.3$ $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]/10 \text{ a}$ 。天山以北部的降雨侵蚀力较南部有明显的增加趋势。其中降雨侵蚀力年际变化倾向率最大值为 103.4 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]/10 \text{ a}$, 位于山区的乌鲁木齐牧试站; 最小值为 -29.8 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]/10 \text{ a}$, 位于塔里木盆地的沙雅县。新疆 1981—2018

年 38 个有效测站降雨侵蚀力倾向率空间分布整体表现为西北高东南低趋势, 降雨侵蚀力倾向率与年平均降雨量的空间格局基本相似, 呈北部 {平均倾向率 30.2 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]/10 \text{ a}$ } 高于南部 {平均倾向率 5.6 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]/10 \text{ a}$ } , 山区 {平均倾向率 34.4 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]/10 \text{ a}$ } 高于盆地 {平均倾向率 8.4 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]/10 \text{ a}$ } 的格局。

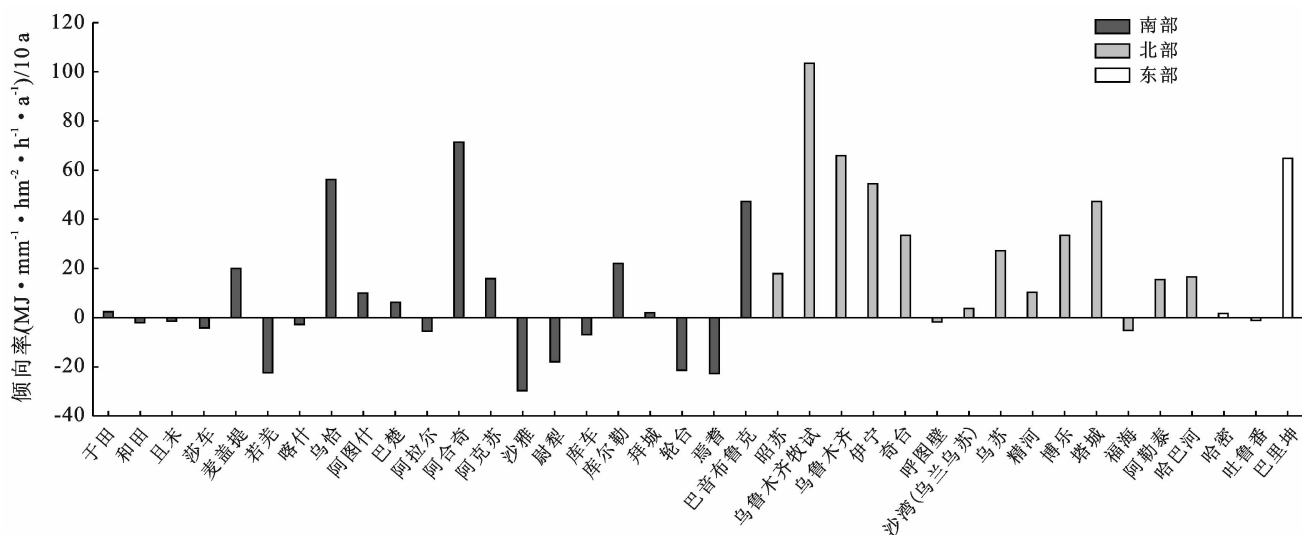


图 3 新疆 1981—2018 年年降雨侵蚀力倾向率空间变化

2.3 降雨与降雨侵蚀力季节变化

利用近 40 a 来春、夏、秋 3 个季节的降雨量与降雨侵蚀力数据进行统计(图 4), 并计算出每个季节的降雨量与降雨侵蚀力的倾向率。由于冬季主要是降雪, 因此假设不产生土壤水力侵蚀, 所以不进行统计。

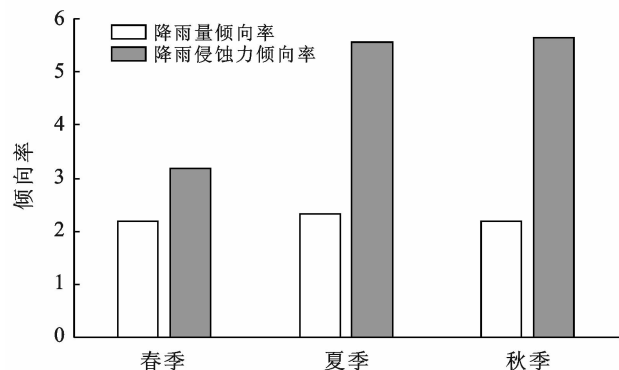


图 4 新疆 1981—2018 年降雨量和年降雨侵蚀力季节倾向率

春、夏、秋季节中降雨量倾向率均为正, 说明近 40 a 来 3 个季节降雨量有增加趋势, 夏季的降雨倾向率最高, 达到了 $2.3 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。春季和秋季次之, 降雨倾向率均为 $2.2 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。在空间上来看, 新疆 3 季降雨量

倾向率普遍呈现增加趋势, 天山以北地区以春季为主, 天山以南地区以夏季为主, 新疆东部地区以春、夏季为主(表 1)。对近 40 a 来各个季节的降雨侵蚀力进行汇总(表 1), 并分别计算春、夏、秋季节降雨侵蚀力的倾向率, 由表可知, 春、夏、秋季节降雨侵蚀力的倾向率均为正, 说明近 40 a 来降雨侵蚀力 3 个季均有增加趋势。其中秋季的降雨侵蚀力倾向率最高, 达到了 5.6 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]/10 \text{ a}$, 表现为降雨侵蚀力增加趋势最明显。夏季次之, 达到 5.5 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]/10 \text{ a}$, 春季为 3.2 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]/10 \text{ a}$ 。在空间上来看, 总体上新疆 3 季降雨侵蚀力大部分站点呈增加趋势, 但北部与南部地区在季节上降雨侵蚀力倾向率有显著区别, 新疆北部地区以春季和夏季为主, 秋季多数地区呈现减少趋势; 新疆南部地区夏季和秋季为主, 春季多地区呈现减少趋势; 新疆东部降雨侵蚀力夏季主要呈现增加趋势(见表 1)。

2.4 降雨与降雨侵蚀力年内分配

计算各月的降雨量和降雨侵蚀力分别占年年雨量和侵蚀力值的比率, 并以此为基础绘制新疆内北部、东部以及南部 3 个区域多年降雨和降雨侵蚀力的年内分配图。

表 1 新疆 1981—2018 年季节降雨侵蚀力和降雨量的倾向率

地区	降雨侵蚀力倾向率			降雨量倾向率			
	春季	夏季	秋季	春季	夏季	秋季	
北部	哈巴河	6.05	5.75	2.94	6.41	3.06	2.77
	福海	-2.02	-7.18	3.20	3.10	-5.19	1.45
	阿勒泰	0.53	8.42	3.88	2.05	0.38	4.05
	塔城	18.29	-11.78	30.91	3.07	-1.43	7.60
	博乐	9.83	11.74	13.69	6.65	5.76	2.20
	精河	-1.85	9.12	3.25	1.08	2.87	1.58
	乌苏	31.88	-6.09	-4.91	10.88	6.09	1.64
	沙湾(乌兰乌苏)	12.85	-6.66	-4.89	7.44	-1.44	-1.05
	呼图壁	6.72	-4.61	-4.33	6.15	0.42	-0.13
	奇台	3.49	12.87	12.61	5.50	1.73	0.87
	伊宁	4.70	21.70	23.53	4.48	4.06	5.77
	昭苏	-1.11	9.23	10.48	5.60	4.56	4.64
	乌鲁木齐	43.25	4.10	4.16	8.62	-0.88	0.21
	乌鲁木齐牧试	55.43	31.11	15.47	22.21	-19.61	5.73
南部	巴音布鲁克	-1.96	45.70	3.99	2.00	14.56	2.53
	焉耆	-0.20	-19.78	-3.11	2.21	-4.71	-1.80
	阿克苏	-0.37	8.64	8.27	-1.12	5.29	3.34
	拜城	-13.97	6.13	10.01	-6.82	3.33	4.26
	沙雅	-9.65	-25.76	1.83	-4.15	-4.83	1.15
	轮台	-5.51	-14.71	-1.27	-2.78	-5.12	-0.25
	库车	-5.39	-2.11	0.47	-2.27	3.35	1.54
	尉犁	-3.76	-15.36	1.13	-0.65	-6.37	0.81
	库尔勒	2.30	23.85	-3.27	0.75	4.01	-1.92
	阿图什	0.10	4.42	1.18	1.21	4.93	2.99
	乌恰	3.69	34.66	15.36	2.09	20.03	5.97
	喀什	-7.93	-3.37	5.34	0.42	4.87	3.84
	阿合奇	-2.41	44.41	29.33	-1.74	24.87	7.40
	巴楚	-5.57	6.34	5.39	-1.44	4.45	1.67
	阿拉尔	-3.26	-7.43	5.62	-1.98	0.67	2.87
	若羌	-0.09	-22.71	0.32	-0.09	-1.44	0.50
	麦盖提	-5.72	23.57	2.12	-0.75	6.62	1.75
	莎车	-6.07	-0.29	2.38	-0.71	2.32	1.06
和田	1.86	-4.85	0.96	2.06	0.46	1.85	
且末	-2.06	0.64	0.00	-0.13	-2.55	0.87	
于田	-14.77	9.08	8.20	-2.31	3.89	2.90	
东部	吐鲁番	0.00	-1.04	0.00	-0.03	-0.22	-0.53
	巴里坤	13.69	40.69	10.37	5.69	7.05	3.48
	哈密	0.04	2.24	-0.66	0.58	2.48	-0.48

由图 5 可知,降雨年内分配呈中央集中格局,但不同区域集中程度不同。全年降雨量占比 5% 以上月数,在时间持续上看,新疆北部 7 个月(4—10 月)和东部 7 个月(4—10 月)比南部 6 个月(4—9 月)长,但最高降雨量占比,为南部 19.78% > 东部 17.98% > 北部 17.27%。从降雨侵蚀力年内分布情况可以

看出(见图 5),新疆不同地区多年平均降雨侵蚀力年内分配呈不同程度的中央集中格局,但不同区域集中程度不同。全年降雨侵蚀力占比 5% 以上月数,天山以北地区 8 个月(4—11 月)长于比南部 5 个月(5—9 月)和东部 3 个月(6—8 月),但最高降雨量侵蚀力占比,东部为 53.13% > 南部 22.17% > 北部

20.54%。降雨和降雨侵蚀力年份分配格局相似,呈中央集中格局,不同区域集中程度不同

之处在于,年内集中程度均为降雨侵蚀力高于降雨量。

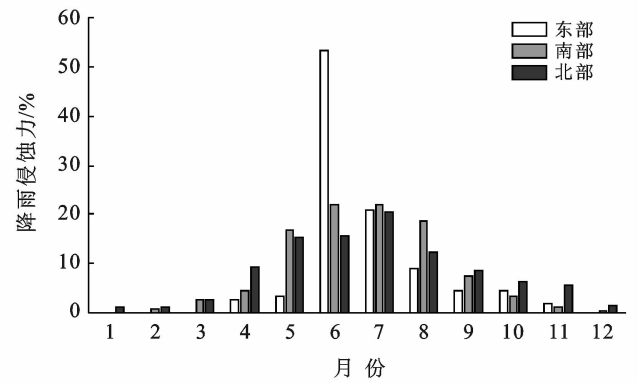
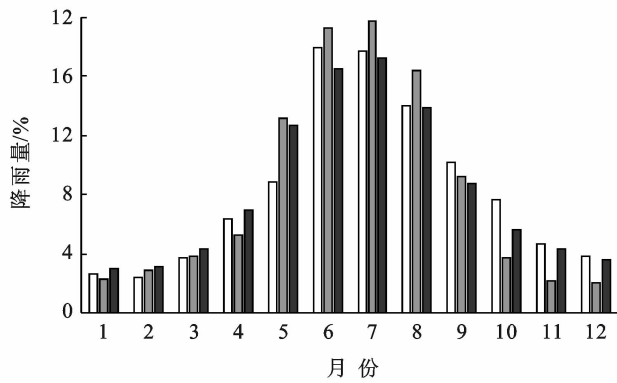


图 5 新疆 1981—2018 年平均降雨和降雨侵蚀力年内分配

3 讨论

本文研究结果表明新疆总体上多年平均降雨量呈西高东低,中高南北低格局,这与前人研究结果^[31]相一致,可解释为研究区受西风环流、北大西洋涛动、地形、地理因素的影响^[38],形成了新疆降水时空分布特有格局。多年平均降雨量和降雨侵蚀力的空间格局相似,这与前人研究结果^[29]相一致,这可解释为降雨侵蚀力受降雨量与降雨强度两个因素影响较大^[8],因此表明降雨侵蚀力和降雨量的空间分布具有相似性。有研究表明研究区的降雨量增加主要是降雨强度增加引起^[39-40],所以年际表现为降雨与降雨侵蚀力具有相对一致的波动增加趋势,且增加速率表现为降雨侵蚀力略高于降雨量。

对降雨、降雨侵蚀力和高程相关分析(见表 2),可以看出,海拔 $\geq 1\ 000\text{ m}$ 地区的降水量、降雨侵蚀力均与高程呈极显著正相关,降水量的高程效应表现为 0.799 mm/m ,降雨侵蚀力的高程效应为 0.786

$[\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})]/\text{m}$,即随海拔升高,降雨量和降雨侵蚀力增加;而海拔 $< 1\ 000\text{ m}$ 的地区,降水量、降雨侵蚀力均与高程的相关性较弱,因而海拔对降雨和降雨侵蚀力的影响较弱。在全国范围和西南地区^[26],黄土高原地区^[29-30]降雨侵蚀力空间分布特征与降雨侵蚀力存在高程效应,可见这与前人研究结果相一致。由表 2 可以看出,研究区降雨量与降雨侵蚀力在海拔 $< 1\ 000\text{ m}$ 与 $\geq 1\ 000\text{ m}$ 地区的相关系数分别为 $r=0.859, p<0.01$; $r=0.973, p<0.01$,表明降雨量与降雨侵蚀力具有呈非常显著的正相关关系,即高程对降雨侵蚀力影响明显,另外天山山区年降雨整体上在地表至 $4\ 000\text{ m}$ 范围内呈现典型线性增加特征^[41],可能在海拔 $1\ 000\sim 4\ 000\text{ m}$ 间地区的海拔对降雨侵蚀力变化影响相对较为明显。多年平均降雨侵蚀力年内分配呈不同程度的集中在“春夏”格局,但不同区域集中程度不同。这可解释为西风环流携带地中海东部的水汽由中亚方向输入^[42],夏季西风将大西洋和北冰洋的水汽携至天山^[41],促进水汽形成时空分异。

表 2 新疆降雨量、降雨侵蚀力与高程的关系

高程/m	降雨量与降雨侵蚀力		降雨量与高程		降雨侵蚀力与高程	
	线性方程	相关系数	线性方程	相关系数	线性方程	相关系数
$< 1\ 000$	$y=0.971x-14.869$	0.859**	$y=0.03x+175.611$	-0.079	$y=0.07x+91.132$	0.164
$\geq 1\ 000$	$y=1.219x-4.642$	0.973**	$y=2.77x+1068.114$	0.799**	$y=0.284x+241.697$	0.786**
全疆	$y=1.137x-16.377$	0.925**	$y=0.076x+72.596$	0.366*	$y=0.136x+12.78$	0.533**

注:①**表示相关性在 0.01 显著水平上(双尾检验);②*表示相关性在 0.05 显著水平上(双尾检验);③以海拔 $1\ 000\text{ m}$ 为界线分区统计(新疆海拔 $< 1\ 000\text{ m}$ 与 $\geq 1\ 000\text{ m}$ 地区气象站点数均为 19)。

降雨量与降雨侵蚀力的时空分布特征相似,但是由于土壤侵蚀还受植被、土地利用和水土保持等多种因素的影响^[29],故时空分布上侵蚀力与实际土壤流失的可能会有差异。近年来,气候变化背景下,新疆降

水处于不同程度的增加趋势已经得到众多学者的认同^[43]。在气候变化下,研究表明降水的与植被覆盖相关系数为 0.8 ^[44-45],降水增加也会也将会正向影响地表植被。那么可以推测未来在新疆“暖干”“暖湿”

的转变背景下,降雨侵蚀力可能会继续处于增加趋势。虽然降水增加对植被的有积极促进作用,对于水土流失来讲,植被水土保持的作用将会提高^[46],但同时降雨侵蚀力也会增强,所以在气候变化—新疆强降水比重加大背景下^[39-40,47],新疆区域的水力侵蚀,特别是山区水力侵蚀不容忽视。

4 结论

(1) 新疆总体上多年平均降雨量和降雨侵蚀力空间格局相似,空间呈西高东低,中高南北低格局,即北部>东部>南部;山区>盆地。

(2) 总体上 1981—2018 年新疆年降雨量与年降雨侵蚀力处于波动增加趋势,但因区域不同而有差异,表现为降雨侵蚀力倾向率为北部高于南部,中部高于南北格局。天山北部、南部多呈正值,南部多为负值或持平。

(3) 降雨侵蚀力倾向率在新疆区域四季分配格局不同,北部区域春季和夏季较高,南部大部分区域在夏、秋季较高,但少部分区域春、夏季呈现减少趋势,东部夏季呈增加趋势。

(4) 多年平均降雨侵蚀力年内分配呈集中在“春夏”格局,但不同区域集中程度不同,但年内集中程度均为降雨侵蚀力高于降雨量。

(5) 气候和海拔是影响降雨侵蚀力格局的关键要素,在气候变化背景下,春夏季的大降水事件对新疆山区水力侵蚀不容忽视。

[参 考 文 献]

- [1] Panagos P, Borrelli P, Meusburger K, et al. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):1-12.
- [2] 章文波,谢云,刘宝元. 中国降雨侵蚀力空间变化特征 [J]. *山地学报*, 2003, 21(1):33-40.
- [3] 郑粉莉,王占礼,杨勤科. 我国水蚀预报模型研究的现状、挑战与任务 [J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(1):7-14.
- [4] 章文波,付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力 [J]. *资源科学*, 2003, 25(1):35-41.
- [5] 章文波,谢云,刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究 [J]. *地理科学*, 2002, 22(6):705-711.
- [6] 殷水清,谢云,王春刚. 用小时降雨资料估算降雨侵蚀力的方法 [J]. *地理研究*, 2007, 26(3):541-547.
- [7] Angulo-Martinez M, Begueria S. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain) [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 379(1):111-121.
- [8] 王万忠,焦菊英. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布 (II) [J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(1):29-39.
- [9] Ferro V, Porto P, Yu B. A comparative study of rainfall erosivity estimation for Southern Italy and Southeastern Australia [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1999, 44(1):3-24.
- [10] 姬翠翠,李晓松,曾源,等. 基于遥感和 GIS 的宣化县水土流失定量空间特征分析 [J]. *国土资源遥感*, 2010(2):107-112, 117.
- [11] Lee J H, Heo J H. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(1/2):30-48.
- [12] 杨孟豪,曹连海,夏帆,等. 河南省许昌市降雨侵蚀力演变特征研究 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(17):281-288.
- [13] 章文波,谢云,刘宝元. 降雨侵蚀力研究进展 [J]. *水土保持学报*, 2002, 16(5):43-46.
- [14] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等. 我国西南山区降雨侵蚀力时空变化趋势研究 [J]. *地球科学进展*, 2012, 27(5):499-509.
- [15] Zhu Zhongli, Yu Bofu. Validation of rainfall erosivity estimators for mainland China [J]. *Transactions of the ASABE*, 2015, 58(1):61-71.
- [16] 何绍浪,郭小君,李凤英,等. 中国南方地区近 60 年来降雨量与降雨侵蚀力时空变化研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(9):1406-1416.
- [17] Keos,何洪鸣,赵宏飞,等. 黄土高原 50 余年来降雨侵蚀力变化及其对土壤侵蚀的影响 [J]. *水土保持研究*, 2018, 25(2):1-7.
- [18] Capolongo D, Diodato N, Mannaerts C M, et al. Analyzing temporal changes in climate erosivity using a simplified rainfall erosivity model in Basilicata (Southern Italy) [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 356(1/2):119-130.
- [19] Xie Yun, Yin Shui qing, Liu Baoyuan, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535:547-558.
- [20] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等. 1960—2009 年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势 [J]. *地理研究*, 2013, 32(2):245-256.
- [21] 马良,姜广辉,左长清,等. 江西省 50 余年来降雨侵蚀力变化的时空分布特征 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10):61-68.
- [22] 刘燕玲. 黑龙江省降雨侵蚀力的变化规律 [D]. 黑龙江哈尔滨:东北林业大学, 2010.
- [23] 刘春利,杨勤科,谢红霞. 延河流域降雨侵蚀力时空分布特征 [J]. *环境科学*, 2010, 31(4):850-857.
- [24] 赖成光,陈晓宏,王兆礼,等. 珠江流域 1960—2012 年降

- 雨侵蚀力时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8):159-167.
- [25] Huang Jin, Zhang Jinchi, Zhang Zengxin, et al. Spatial and temporal variations in rainfall erosivity during 1960—2005 in the Yangtze River basin [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013, 27(2):337-351.
- [26] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等. 我国西南山区降雨侵蚀力时空变化趋势研究[J]. 地球科学进展, 2012, 27(5):499-509.
- [27] 周伏建,黄炎和. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1):13-18.
- [28] 温美丽,张虹鸥,杨宪杰. 广东省主要站点降雨侵蚀力时间分布规律研究[J]. 热带地理, 2007, 27(2):102-106.
- [29] 殷水清,谢云. 黄土高原降雨侵蚀力时空分布[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4):29-33.
- [30] 陈浩. 黄土高原退耕还林前后流域土壤侵蚀时空变化及驱动因素研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- [31] 康婷,胡锡健,张辉国. 基于新疆地区降水量与气温的空间异质性的空间展开模型分析[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2015, 29(2):36-39, 43.
- [32] 江远安,刘精,邵伟玲,等. 1961—2013年新疆不同时间尺度降水量的气候特征及其历史演变规律[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6):1363-1375.
- [33] 杨光华,包安明,陈曦,等. 1998—2007年新疆植被覆盖变化及其驱动因素分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3):436-445.
- [34] 王让会,张慧芝,卢新民. 新疆绿洲空间结构特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(3):109-133.
- [35] 颜安. 新疆土壤有机碳/无机碳空间分布特征及储量估算[D]. 北京:中国农业大学, 2015.
- [36] 李炳元,潘保田,程维明,等. 中国地貌区划新论[J]. 地理学报, 2013, 68(3):291-306.
- [37] 孙丽丽,查轩. 海南省60多年来降雨量及降雨侵蚀力变化趋势[J]. 亚热带水土保持, 2019, 1(3):23-24.
- [38] Lioubimtseva E, Henebry G M. Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations [J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(11):963-977.
- [39] 陈冬冬,戴永久. 近五十年我国西北地区降水强度变化特征[J]. 大气科学, 2009, 33(5):923-935.
- [40] 慈晖,张强,张江辉,等. 1961—2010年新疆极端降水过程时空特征[J]. 地理研究, 2014, 33(10):1881-1891.
- [41] 张正勇,何新林,刘琳,等. 中国天山山区降水空间分布模拟及成因分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(4):500-508.
- [42] Chen F H, Chen J H, Holmes J, et al. Moisture changes over the last millennium in arid Central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(7/8):1055-1068.
- [43] Wang J, Chen F, Jin L, et al. Characteristics of the dry/wet trend over arid Central Asia over the past 100 years [J]. *Climate Research*, 2010, 41(1):51-59.
- [44] Gessner U, Naeimi V, Klein I, et al. The relationship between precipitation anomalies and satellite-derived vegetation activity in Central Asia [J]. *Global & Planetary Change*, 2013, 110(S):74-87.
- [45] 王新军,赵成义,杨瑞红,等. 基于像元二分法的沙地植被景观格局特征变化分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3):285-294.
- [46] Zhang Xingchang, Shao Mingan. Effects of vegetation coverage and management practice on soil nitrogen loss by erosion in a hilly region of the Loess Plateau in China [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(10):1195-1203.
- [47] Grygar T. Variability in precipitation, temperature and river runoff in W Central Asia during the past-2,000 years [J]. *Global & Planetary Change*, 2011, 76(1):95-104.