

网络出版时间:2017-11-06 13:53

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.12.019

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20171106.1353.038.html>

流域下垫面特征对多年平均径流系数的影响

石扬旭,张友静,李鑫川,宋军伟

(河海大学 地球科学与工程学院,江苏 南京 210098)

【摘要】【目的】分析流域地貌结构特征、土地利用/覆盖分类以及土壤物理性质对其多年平均径流系数的影响,确定影响流域多年平均径流系数的重要下垫面因子,为流域土地利用、水利工程建设、防洪减灾、水资源开发利用等人类开发活动提供科学依据。【方法】选取淮河流域上游 23 个小流域为研究对象,使用 ArcGIS10.3 等软件处理得到坡度、面积高程积分、曲率、河网分形维数等流域地貌结构特征因子,使用遥感图像处理软件 ENVI5.1 处理得到流域土地利用分类结果,并在 EXCEL 中对流域多年平均径流系数和各下垫面因子进行相关性分析。【结果】在流域地貌结构因子中,多年平均径流系数与平均坡度和面积高程积分关系最好,且均为正相关关系,确定性系数分别为 0.485 7 和 0.478 6。在土地利用/覆盖方面,林地、耕地面积所占比例对多年平均径流系数有较大影响,其中林草地面积占比与流域多年平均径流系数呈正相关关系,耕地面积占比与流域多年平均径流系数呈负相关关系,确定性系数分别为 0.292 和 0.262 3。在土壤条件方面,各因子与多年平均径流系数相关性均较为微弱。【结论】在研究区内众多地貌结构因子中,平均坡度和面积高程积分对多年平均径流系数影响最大,林地、耕地面积所占比例影响较大,土壤物理性质则影响微弱。

【关键词】 多年平均径流系数;下垫面;地貌结构特征;土地利用/覆盖;土壤物理性质;淮河流域

【中图分类号】 TV121

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2017)12-0138-10

Influence of underlying surface characteristics of river basin on annual runoff coefficient

SHI Yangxu,ZHANG Youjing,LI Xinchuan,SONG Junwei

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: 【Objective】 The effects of geomorphic structure features, land use/cover classification and soil physical properties on mean annual runoff coefficient were analyzed to obtain important underlying factors affecting the mean annual runoff coefficient and provide scientific basis for human development activities such as land use, water conservancy construction, flood control and disaster mitigation, as well as water resources development and utilization. 【Method】 A total of 23 small watersheds in the upper Huaihe River were selected, and features of landform such as slope, elevation integral, curvature and river network fractal dimension were obtained by ArcGIS10.3 software. The land use classification results of watershed were processed by remote sensing with ENVI5.1, and correlation coefficients between average annual runoff coefficient and underlying surface factors were analyzed in EXCEL. 【Result】 Among the basin geomorphic structure factors, mean annual runoff coefficient has the best relationship with mean slope and area elevation integral with positive correlation coefficients of 0.485 7 and 0.478 6, respectively. In the aspect of land use/cover, proportions of forestland and arable land had great influence on mean annual runoff coefficient.

【收稿日期】 2016-10-20

【基金项目】 国家重大科技专项(08-Y30B07-9001-13/15)

【作者简介】 石扬旭(1992—),男,山东滕州人,在读硕士,主要从事遥感技术机理与应用研究。E-mail:764617615@qq.com

【通信作者】 张友静(1953—),男,江苏南京人,教授,博士生导师,主要从事遥感、GIS应用研究。E-mail:zhangyj@hhu.edu.cn

The proportion of forestland area was positively related with the mean annual runoff coefficient of river basin with coefficient of 0.292, while proportion of cultivated land area was negatively related with it with deterministic coefficient of 0.262 3. Factors of soil condition had weak relationships with mean annual runoff coefficient. 【Conclusion】 In the study area, the mean slope and area elevation integral had the greatest influence on average runoff coefficient, followed by the proportions of woodland and cultivated land, while soil physical properties had weak effects.

Key words: mean annual runoff coefficient; underlying surface; geomorphic structure features; land use/land cover; soil physical properties; Huaihe River Basin

流域的下垫面特征影响着流域的水文过程,最直接的表现就是流域径流量的变化。当降雨、蒸散发等气象过程相同时,一个流域的出口断面流量过程的形成将取决于其下垫面条件^[1]。流域的下垫面特征包括地形地貌特征、土地利用方式、土壤物理性质等方面,这些因素各自或者随机组合构成差异性明显的下垫面,进而影响流域径流的产流机制、产流方式及产流条件。关于地形地貌特征对径流的影响,有研究已经证明,山坡地貌特征对于土壤含水量、产流面积空间分布等是重要的控制因素^[2-5]。刘金涛等^[6]进一步探究地貌结构特征对径流特征的影响,发现流域高程曲线积分值及其斜率对径流特征影响最大。土地利用/覆盖的结构和功能与水量平衡、能量平衡联系密切,是径流量变化的外在动力之一^[7]。Ferreira 等^[8]通过模拟降雨试验,认为城镇用地更容易产生地表径流,其次是林地,最后是耕地。地表径流量又与表层土壤物理性质关系密切。土壤物理性质包括土壤的颜色、质地、孔隙、结构、水分、热量和空气状况等,其中以土壤质地、土壤结构和土壤水分居主导地位,其变化常引起土壤其他物理性质和过程的变化。土壤饱和导水率作为土壤重要的物理性质指标之一,是计算土壤剖面中水的通量和设计灌溉、排水系统工程的一个重要土壤参数,也是水文模型中的重要参数,其准确与否严重影响模型的预测精度^[9]。吴夏懿等^[10]根据 Budyko 方程,引入了可以反映流域下垫面特征的 n 值,并分析了贵州省岩溶地区下垫面整体特征对年径流系数的影响,但是缺乏关于土地利用、植被覆盖、土壤和地质条件等具体下垫面因素对年径流系数影响的分析。因此,有必要将地形地貌特征、土地利用方式、土壤物理性质放在一起讨论流域下垫面特征对水文过程的影响。

本研究通过分析淮河流域上游 23 个小流域多年平均径流系数与流域地貌结构因子、土地利用/覆盖状况以及土壤物理性质之间的关系,旨在揭示影

响径流系数的重要下垫面因子,从而为流域土地利用、水利工程建设、防洪减灾、水资源开发利用等人类开发活动提供科学依据。

1 研究区概况、数据获取与处理

1.1 研究区域概况

以淮河上游的 23 个小流域为研究对象,这些小流域由北到南分别属于颍河、洪河、淮河、史淝河 4 个水系(图 1)。淮河流域位于中国东部,南北分别是长江流域和黄河流域。淮河西起桐柏山、伏牛山,东至黄海,流域地形大体为西北高东南低。西部伏牛山、桐柏山高程为 200~300 m,南部大别山区高程为 300~500 m。流域内山丘面积约占总面积的 1/3,平原面积约占总面积的 2/3。淮河流域地处中国南北气候过渡带,属暖温带半湿润季风气候区,冬春干旱少雨,夏秋闷热多雨,冷暖和旱涝转变急剧。

1.2 数据获取与处理

1.2.1 地形数据的获取与处理 研究区地形资料采用 ASTER 全球数字高程模型数据,分辨率为 90 m。流域边界及水系根据全球数字高程模型数据 GDEM V2 提取,数据来源于美国 NASA 的 LP-DAAC(美国陆地过程分布式活动档案中心, <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/index.jsp>); 水文站点坐标数据来自淮河流域水文年鉴。根据流域数字高程模型(digital elevation model, DEM)分别计算流域各个地貌结构因子。坡度是过地表面任一点的切平面与水平地面的夹角^[11];曲率是表面的二阶导数,或者可称之为坡度的坡度。曲率为正说明该像元的表面向上凸,曲率为负说明该像元的表面开口朝上凹入,值为 0 说明表面是平的。作为流域地形地貌特征的一阶、二阶导数,平均坡度、曲率反映了流域整体地形的起伏情况。作为反映流域内水系结构发育情况的特征值,河网分形维数广泛应用于河流形态特征以及降水径流过程的研究中^[12]。高程曲线反映了流域某一高程处的水平截面面积与

该高程的关系^[13]。对相对高程曲线进行积分,得到的积分值越大,流域内地势起伏越大,沟谷越多,反之地势越平坦。因此高程曲线积分值可以很好地体

现流域的地形地貌特性。各地貌结构因子均用地理信息基础软件 ArcGIS10.3 来提取,其计算公式如表 1 所示。

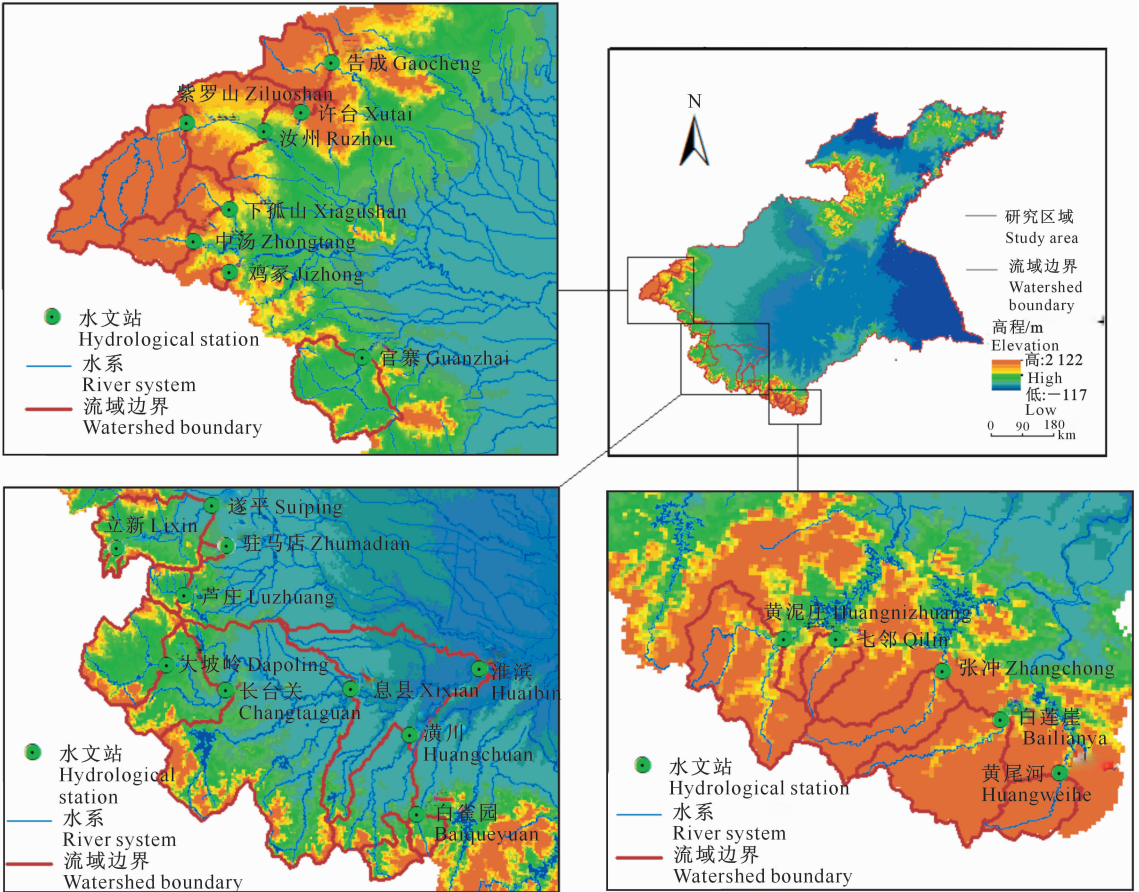


图 1 研究区地理位置
Fig. 1 Geographical location of the study area

表 1 流域地貌结构因子计算公式

Table 1 Calculation formula of geomorphic structure factor

地貌结构因子 Geomorphological factor	计算公式 Calculation formula	说明 Description
坡度 Slope	$\text{Slope} = \arccos \frac{\vec{z} \cdot \vec{n}}{ \vec{z} \vec{n} }$	坡度表示地表面在该点的倾斜程度,在数值上等于过该点的地表微分单元的法向量 $\vec{n}$ 与 z 轴的夹角,其中 $\vec{n}$ 为该点切平面的法向量, $\vec{z}$ 为水平地面的法向量 ^[11] The slope represents the degree of inclination of ground surface at that point and numerically equals to the normal vector of the surface differential unit passing through the point. $\vec{n}$ is the normal vector of the tangent plane, $\vec{z}$ is the normal vector of the horizontal ground
河网分形维数 Rivernetwork fractal dimension	$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln r}$	$N(r)$ 为非空网格数, r 为网格大小 ^[12] $N(r)$ is the number of non-empty grids, r is the mesh size
面积高程积分 Area elevation integration	$HI \approx \frac{\bar{H} - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}}$	$\bar{H}$ 为流域平均高程, $H_{\max}$ 为流域最大高程, $H_{\min}$ 为流域最小高程 ^[14] $\bar{H}$ is the average elevation of the basin, $H_{\max}$ is the maximum elevation of the basin, and $H_{\min}$ is the minimum elevation of the basin

1.2.2 土地利用/覆盖数据的获取与处理 采用遥感图像解译的方法获得研究区土地利用分类数据。遥感图像分类就是利用不同地物具有不同的光谱特征,通过对各类地物的光谱特征分析来选择特征参

数,将特征空间划分为互不重叠的子空间,然后将影像内各个像元划分到各个子空间中去,从而实现分类^[15]。本研究中,遥感影像数据选用的是 2010 年 Landsat TM 影像数据,遥感图像处理软件使用

ENVI5.1。在进行图像辐射校正和几何校正后,采用监督分类(supervised classification)方法,生成 30 m 分辨率的遥感解译图和相应的属性数据。根据不同类型土地利用要素对径流及水循环的影响特性,将研究区土地利用类型分为林草地、水体、耕地和不透水面 4 种。

1.2.3 土壤数据的获取与处理 研究区土壤数据来自全球土壤数据库 HWSOV1.1(harmonized world soil database)。土壤按质地可以分为砂土、黏土、壤土 3 类,砂土含沙量多,颗粒粗糙,渗水速度快,保水性能差,通气性能好;黏土含沙量少,颗粒细腻,渗水速度慢,保水性能好,通气性能差;壤土含沙量一般,颗粒一般,渗水速度一般,保水性能一般,通气性能一般。

土壤饱和导水率 K_s 是土壤被水饱和时,单位水势梯度下单位时间内通过单位面积的水量,是一个重要的土壤水分运动参数,主要反映土壤入渗和透水性能,同时也是估算非饱和导水率、模拟土壤水分运动和溶质运移的重要参数之一,可以参考 Sax-

ton 等^[16]的方法计算。

1.2.4 水文数据的获取与处理 径流深 R 是指将径流总量平铺在整个流域面积上所求得的水层深度,能进一步揭示径流的变化特点^[17],其常用单位为毫米(mm)。若时段为 Δt (s),平均流量为 Q (m^3/s),流域面积为 A (km^2),则径流深 R (mm)的计算公式为:

$$R=\frac{Q\Delta t}{1\,000A}。$$

径流系数 α (runoff coefficient)是一定汇水面积内总径流量(mm)与降水量(mm)的比值,是任意时段内的径流深度 R 与造成该时段径流所对应的降水深度 X 的比值。径流系数反映出流域降水到径流的转变量,体现了各自然地理要素对径流的综合影响。其计算公式如下:

$$\alpha=\frac{R}{X}。$$

本研究中,降水径流等水文数据来自 1955—2012 年《淮河流域水文年鉴》,表 2 为对应的流域多年平均降水量和多年平均径流系数值。

表 2 淮河上游 23 个小流域的多年平均降水量与径流特征值

Table 2 Multi-year mean precipitation and runoff eigenvalue of 23 small watersheds in the upper reaches of Huaihe River				
水系 River system	流域 Watershed	集水面积/ km^2 Catchment area	多年平均降雨量/mm Mean annual rainfall	多年平均径流系数 Mean multi-year runoff coefficient
颍河 Yinghe	告成 Gaocheng	627	661.80	0.16
	中汤 Zhongtang	485	962.44	0.41
	鸡冢 Jizhong	46	1 092.17	0.50
	下孤山 Xiagushan	354	776.78	0.35
	紫罗山 Ziluoshan	1 800	716.32	0.34
	汝州 Ruzhou	3 005	702.93	0.33
	许台 Xutai	70	616.63	0.29
	官寨 Guanzhai	1 194	872.56	0.30
	均值 Average	948	800.20	0.33
洪河 Honghe	芦庄 Luzhuang	396	978.04	0.30
	立新 Lixin	78	954.77	0.39
	遂平 Suiping	1 760	957.03	0.30
	驻马店 Zhumadian	104	997.74	0.23
	均值 Average	584	971.89	0.30
淮河 Huaihe	大坡岭 Dapoling	1 640	988.68	0.33
	长台关 Changtaiguan	3 090	996.83	0.31
	息县 Xixian	10 190	1 007.83	0.33
	潢川 Huangchuan	2 050	1 023.75	0.38
	淮滨 Huaibin	16 005	939.83	0.32
	白雀园 Baiqueyuan	284	1 187.06	0.56
	均值 Average	5 543	1 024.00	0.37
史潞河 Shipihe	黄泥庄 Huangnizhuang	805	1 413.73	0.46
	七邻 Qilin	185	1 430.73	0.58
	黄尾河 Huangweihe	270	1 517.93	0.73
	白莲崖 Bailianya	747	1 393.14	0.60
	张冲 Zhangchong	493	1 572.98	0.50
	均值 Average	500	1 465.70	0.57

由表 2 可以看出,由颍河水系到史潞河水系,4 个水系多年平均径流系数大体上是由北向南呈递增趋势。一方面,这与淮河流域不同地区的气候背景

条件有很大关系,例如淮河流域的蒸发能力从北向南有明显降低趋势^[18],导致越往南部径流比率越高;另一方面,这也与其下垫面特征密切相关。

2 结果与分析

2.1 地貌结构特征与多年平均径流系数的关系

淮河上游 23 个小流域地貌结构因子特征值计算结果见表 3。表 3 显示,总体上看,颍河水系和史淝河水系平均高程和平均坡度均值都较大,而洪河水系和淮河水系则较小,这是由于颍河水系和史淝河水系位于山区,而洪河水系和淮河水系位于平原区的缘故。史淝河水系 5 个流域的坡度平均值最大,而洪河水系中 4 个流域的坡度平均值最小,说明

史淝河水系地形最陡峭,而洪河水系地形最平坦。除告成等流域平均曲率为正外,其余大部分为负,说明告成等流域坡面是向上凸的,其他流域坡面均向上凹。各流域的河网分形维数为 1.01~1.18,其中长台关流域的河网分形维数最大,为 1.18,鸡冢、立新、驻马店流域最小,为 1.01。黄尾河流域面积高程积分值最大,为 0.49,说明黄尾河流域内地形起伏最大,沟谷较多;相比之下,驻马店流域面积高程积分值最小,为 0.10,说明驻马店流域地形最平坦。

表 3 淮河上游 23 个小流域地貌结构因子特征值

Table 3 Characteristics of geomorphic structure factors of 23 small watersheds in the upper reaches of Huaihe River						
水系 River system	流域 Watershed	平均高程/m Mean elevation	平均坡度/(°) Mean slope	平均曲率/10 ⁻⁴ Mean curvature	河网分形维数 River network fractal dimension	面积高程积分 Area elevation integration
颍河 Yinghe	告成 Gaocheng	499.14	8.15	6.99	1.03	0.20
	中汤 Zhongtang	705.42	16.67	-0.51	1.05	0.25
	鸡冢 Jizhong	394.28	9.36	-27.66	1.01	0.26
	下孤山 Xiagushan	471.12	11.46	-17.75	1.03	0.25
	紫罗山 Ziluoshan	825.90	15.70	-22.68	1.13	0.30
	汝州 Ruzhou	358.00	4.59	-22.82	1.06	0.19
	许台 Xutai	558.47	12.90	25.49	1.03	0.31
	官寨 Guanzhai	174.57	3.60	-4.79	1.05	0.13
	均值 Average	498.36	10.30	-7.97	1.05	0.24
洪河 Honghe	芦庄 Luzhuang	218.96	5.59	-9.78	1.04	0.16
	立新 Lixin	181.40	4.93	-13.49	1.01	0.22
	遂平 Suiping	170.20	4.63	-8.07	1.07	0.14
	驻马店 Zhumadian	108.31	2.03	-5.75	1.01	0.10
	均值 Average	169.72	4.29	-9.27	1.03	0.16
淮河 Huaihe	大坡岭 Dapoling	231.00	6.49	6.45	1.04	0.15
	长台关 Changtaiguan	200.66	5.65	2.40	1.18	0.14
	息县 Xixian	155.16	4.70	2.11	1.07	0.12
	潢川 Huangchuan	149.44	5.43	-6.55	1.05	0.13
	淮滨 Huaibin	130.84	3.94	2.43	1.07	0.11
	白雀园 Baiqueyuan	219.81	8.81	-9.84	1.02	0.18
	均值 Average	181.15	5.83	-0.50	1.07	0.14
史淝河 Shipihe	黄泥庄 Huangnizhuang	500.71	14.94	-40.42	1.03	0.30
	七邻 Qilin	527.43	14.98	-12.73	1.04	0.27
	黄尾河 Huangweihe	852.91	21.07	0.35	1.03	0.49
	白莲崖 Bailianya	667.76	18.80	-4.41	1.07	0.33
	张冲 Zhangchong	681.35	18.04	-11.70	1.03	0.41
	均值 Average	646.03	17.57	-13.78	1.04	0.36

注:表中数据根据全球数字高程模型数据 GDEM V2 使用 ArcGIS 软件提取得到,GDEM V2 数据来自 [http://www.gdem.aster.ersdac. or. jp/index. jsp](http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/index.jsp)。

Note:The data in the table are extracted using ArcGIS software according to the global digital elevation model data GDEM V2 from [http:// www. gdem. aster. ersdac. or. jp/index. jsp](http://www.gdem.aster.ersdac. or. jp/index. jsp).

图 2 给出了 23 个小流域多年平均径流系数与各地貌结构因子的相关关系,并绘制出了趋势线。由图 2 可以发现,在各地貌因子中,除平均坡度和面积高程积分与多年平均径流系数相关性较好(确定性系数分别为 0.485 7 和 0.478 6)外,其他因子相

关性均较弱。同时,流域多年平均径流系数与平均坡度和面积高程积分均为正相关关系。例如在颍河水系中,告成流域的多年平均径流系数(0.16)小于中汤流域(0.41),因为告成流域的平均坡度(8.15°)和面积高程积分(0.20)均小于中汤流域(分别为

16.67°和 0.25)。颍河水系中 8 个流域的平均坡度(10.3°)和面积高程积分(0.24)均小于史滹河水系的 5 个流域(分别为 17.57°和 0.36),同样径流系数平均值(0.33)也小于史滹河水系(0.57)。这是由于

在沟谷较为发育、地势较为陡峭的流域,含水层发育较为薄弱,蓄滞水能力相对较差,因而径流系数较大;而在地势较为平坦的流域,含水层发育充分,蓄滞水能力相对较强,因而径流系数较小。

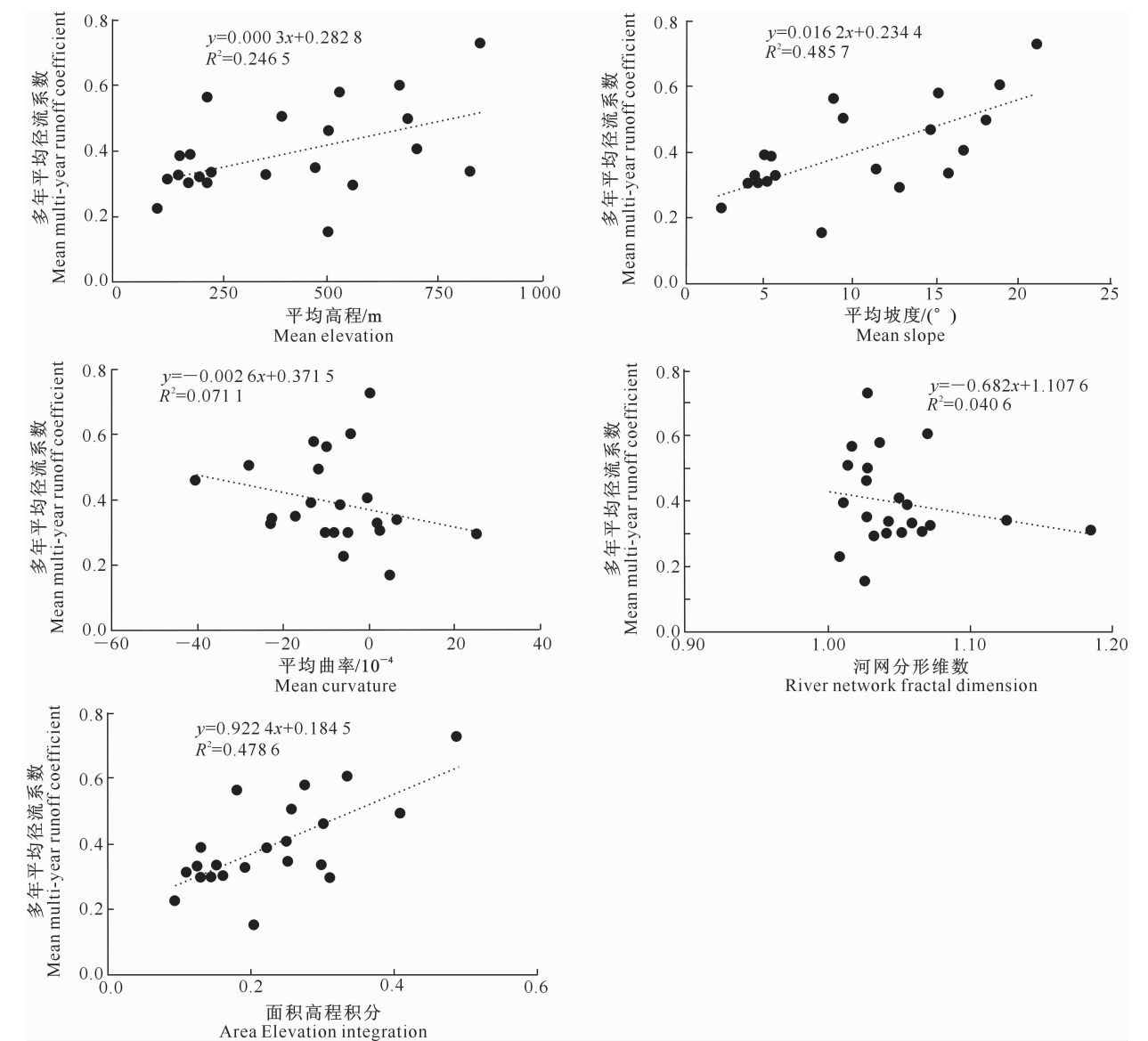


图 2 淮河上游 23 个小流域多年平均径流系数与各地貌因子的关系
Fig. 2 Relationship between mean annual runoff coefficient and landform factors of 23 small watersheds in the upper reaches of Huaihe River

但是,对比鸡豕流域和黄泥庄流域,两个流域的平均坡度和面积高程积分分别为 9.36°,0.26 和 14.94°,0.30,且鸡豕流域的降水远小于黄泥庄流域,而鸡豕流域的多年平均径流系数为 0.50,大于黄泥庄流域的 0.46,这并不符合多年平均径流系数与平均坡度和面积高程积分均为正相关的规律,这也反映出流域多年平均径流系数并不是由地貌因素唯一决定的,而是地形、地貌、土壤、植被、水文地质条件等下垫面因子综合作用的结果。

2.2 土地利用/覆盖与多年平均径流系数的关系
各流域林草地、水体、耕地和不透水面面积所占比例见表 4。由表 4 可以看出,林草地和耕地占研究区域绝大部分面积,水体和不透水面所占比例则很小。在颍河水系和史滹河水系中,林草地面积占比较耕地面积大,而在洪河水系和淮河水系中则相反,这与颍河水系和史滹河水系位于山区,而洪河水系和淮河水系位于平原是分不开的,同时反映出地形地貌特征也会对土地覆盖产生一定的影响。对比

发现,同样位于山区的颍河水系和史潞河水系,它们的林草地和耕地面积比例有较大差别(颍河水系林草地和耕地占比分别为 61.87%和 33.75%,史潞河水系分别为 85.61%和 13.26%),而其多年平均径流系数分别为 0.33 和 0.57;再对比同处于颍河水

系中的官寨和鸡冢两个流域,官寨流域耕地占比最大,为 71.56%,其多年平均径流系数为 0.3,而鸡冢流域中林草地占比为 95.90%,其多年平均径流系数为 0.5,这些都说明林地比耕地更容易产流,这与 Ferreira 等^[8]的研究结论相一致。

表 4 淮河上游 23 个小流域各地类面积所占比例

Table 4 Different land utilization proportion of 23 small watersheds in the upper reaches of Huaihe River %					
水系 River system	流域 Watershed	林草地面积比例 Forest and grassland proportion	水体面积比例 Water proportion	耕地面积比例 Arable land proportion	不透水面面积比例 Impermeable surface proportion
颍河 Yinghe	告成 Gaocheng	38.29	0.17	51.42	10.12
	中汤 Zhongtang	93.45	0.37	5.87	0.32
	鸡冢 Jizhong	95.90	0	4.10	0
	下孤山 Xiagushan	85.22	0.36	13.55	0.86
	紫罗山 Ziluoshan	83.43	0.81	14.82	0.94
	汝州 Ruzhou	60.82	0.67	35.11	3.40
	许台 Xutai	90.72	0.02	7.96	1.30
	官寨 Guanzhai	19.53	1.69	71.56	7.22
	总占比 Total proportion	61.87	0.77	33.75	3.61
洪河 Honghe	芦庄 Luzhuang	70.63	1.05	27.76	0.56
	立新 Lixin	24.30	0.07	72.89	2.74
	遂平 Suiping	25.58	2.31	67.17	4.94
	驻马店 Zhumadian	7.16	0.07	78.44	14.33
	总占比 Total proportion	32.57	1.92	61.04	4.46
淮河 Huaihe	大坡岭 Dapoling	60.71	1.65	36.02	1.62
	长台关 Changtaiguan	53.81	2.22	41.57	2.40
	息县 Xixian	36.40	2.89	54.96	5.75
	潢川 Huangchuan	35.06	2.63	57.13	5.18
	淮滨 Huaibin	28.83	2.82	61.02	7.33
	白雀园 Baiqueyuan	53.28	1.33	44.10	1.29
	总占比 Total proportion	35.62	2.70	55.75	5.93
史潞河 Shipihe	黄泥庄 Huangnizhuang	82.37	0.30	16.54	0.80
	七邻 Qilin	73.69	0.08	25.22	1.01
	黄尾河 Huangweihe	86.76	0.30	12.91	0.03
	白莲崖 Bailianya	89.96	1.31	8.64	0.09
	张冲 Zhangchong	88.11	1.01	10.64	0.24
	总占比 Total proportion	85.61	0.73	13.26	0.41

注:表中数据采用 2010 年 Landsat TM 影像数据,由遥感图像处理软件 ENVI5.1 解译得到;Landsat TM 影像数据来自美国 NASA 的 E-ROS(Earth Resources Observation and Science Center,美国地球资源观测中心,http://glovis.usgs.gov/)。

Note:Data in the table used the 2010 Landsat TM image data interpreted by remote sensing image processing software ENVI5.1. Landsat TM image data were from the United States NASA EROS (Earth Resources Observation and Science Center,the earth observation center, http://glovis.usgs.gov/).

图 3 给出了淮河上游 23 个小流域多年平均径流系数与各土地利用类型面积所占比例之间的关系。多年平均径流系数与土地利用类型面积比例相关性的确定性系数由大到小表现为不透水面(0.411 5)>林草地(0.292)>耕地(0.262 3)>水体(0.035 1)。其中林草地面积占比与流域多年平均径流系数呈正相关关系,而耕地和不透水面面积占比与流域多年平均径流系数呈负相关关系。可以看出,森林使该研究区内的径流总量增加,这也就意味着:(1)森林在研究区内具有增雨功能,否则森林本

身作为一个巨大的耗水系统,不会因其面积比例的增大而导致径流总量增加。(2)森林对研究区内降水的贡献大于自身的损耗,否则即使能够增雨,增加的降水也要被森林自身的生长损耗掉,不会表现出增加流域径流量的功能。

一般理论认为,随着城镇用地的不断扩张,不透水面持续增大,下渗能力减弱^[19],流域径流量不断增大,故径流系数也不断增大。有些学者认为,城镇化对径流量的影响不应一概而论,应从时间尺度上来考虑,如郑璟等^[20]应用 SCS 水文模型对深圳地

区进行了研究,认为总体上城镇化会导致地表径流的增加,但并不适用于城镇化过程的所有阶段,对城镇化的水文响应研究应当针对具体地区、具体时段进行分析。本研究中,不透水面面积占比与流域

多年平均径流系数呈负相关关系,考虑到不透水面积在研究区内所占比例很小,并不一定能够真实反映其对径流变化的影响,故将这一地类的影响舍弃考虑。

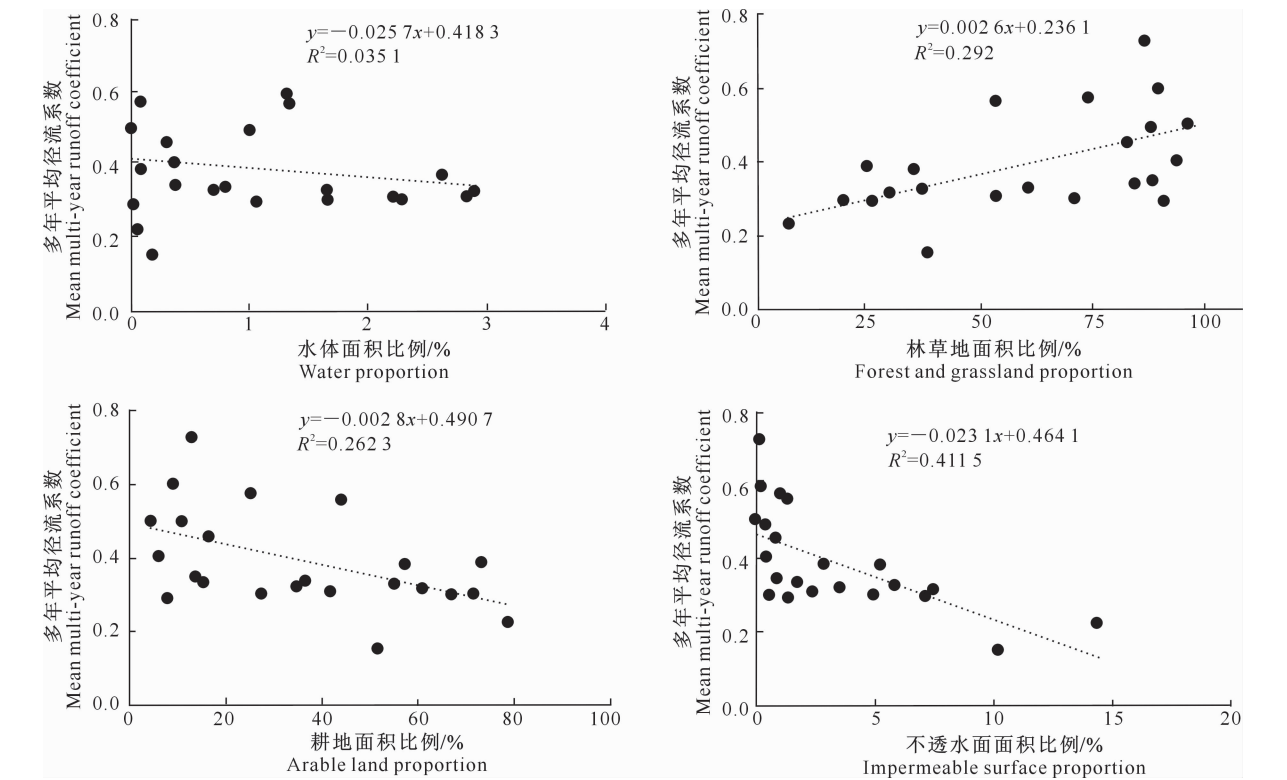


图 3 淮河上游 23 个小流域多年平均径流系数与各地类面积的关系

Fig. 3 Correlation between mean annual runoff coefficient and area of different land use of 23 small watersheds in the upper reaches of Huaihe River

2.3 土壤条件与多年平均径流系数的关系

流域内土壤条件对流域的水分下渗、蒸发和地下最大蓄水量有重大影响。土壤水分是反映土壤性质的重要指标之一,是影响地表径流产生的一个重要因素,也是林木生长和发育的一个必要环境因素,属于土壤物理学的重要内容^[21]。土壤水分动态的变化直接关系到地表径流量,或是地表径流的发

生^[22]。

淮河上游 23 个小流域的砂土、黏土、壤土质量百分比及平均饱和导水率见表 5。从表 5 不难看出,各流域均是砂土质量百分比最高,黏土次之,壤土最少。对于土壤饱和导水率,4 个水系大致呈从北向南逐渐降低的趋势。

表 5 淮河上游 23 个小流域砂土、黏土、壤土的质量百分比及平均饱和导水率

Table 5 Weight percentage of sand, clay and loam and average saturated hydraulic conductivity of 23 small watersheds in the upper reaches of Huaihe River

水系 River system	流域 Watershed	质量百分比/% Weight percentage			饱和导水率/(cm·min ⁻¹) Saturated hydraulic conductivity
		砂土 Sand	黏土 Clay	壤土 Loam	
颍河 Yinghe	告成 Gaocheng	53.68	16.67	6.94	33.24
	中汤 Zhongtang	48.92	20.37	8.10	24.40
	鸡冢 Jizhong	50.03	19.49	8.84	30.88
	下孤山 Xiagushan	65.03	15.33	7.35	41.17
	紫罗山 Ziluoshan	55.80	17.06	7.59	33.42
	汝州 Ruzhou	53.91	17.85	7.90	33.84
	许台 Xutai	46.57	22.08	4.54	14.90
	官寨 Guanzhai	40.51	28.65	7.84	14.40

表 5(续) Continued table 5

水系 River system	流域 Watershed	质量百分比/% Weight percentage			饱和导水率/(cm·min ⁻¹) Saturated hydraulic conductivity
		砂土 Sand	黏土 Clay	壤土 Loam	
洪河 Honghe	芦庄 Luzhuang	41.14	29.66	9.83	15.42
	立新 Lixin	39.45	29.85	5.36	13.29
	遂平 Suiping	41.97	27.15	8.31	22.17
	驻马店 Zhumadian	40.07	32.38	6.71	11.65
淮河 Huaihe	大坡岭 Dapoling	40.73	24.90	10.13	19.11
	长台关 Changtaiguan	38.45	24.48	9.69	16.85
	息县 Xixian	38.90	23.49	9.22	17.54
	潢川 Huangchuan	36.80	20.99	9.46	15.70
	淮滨 Huaibin	38.24	24.15	8.87	17.19
	白雀园 Baiqueyuan	37.90	20.96	11.53	16.65
史渭河 Shipihe	黄泥庄 Huangnizhuang	39.39	21.33	10.91	15.77
	七邻 Qilin	39.10	21.52	9.70	15.00
	黄尾河 Huangweihe	41.31	21.69	8.72	15.54
	白莲崖 Bailianya	39.30	21.54	9.70	15.00
	张冲 Zhangchong	38.83	21.63	7.79	14.36

注:表中数据来自于 HWSD (Harmonized World Soil Database,全球土壤数据库)。

Note:Data in the table werefrom HWSD (Harmonized World Soil Database).

图 4 给出了 23 个小流域多年平均径流系数与各类土壤质量百分比、饱和导水率的关系。由图 4 可以看出,多年平均径流系数与各类土壤质量百分比以及饱和导水率相关性很微弱,除了与壤土质量

百分比相关性的确定性系数为 0.181 2,其余确定性系数均小于 0.1,这说明在研究区内,土壤条件对流域径流系数影响微弱。

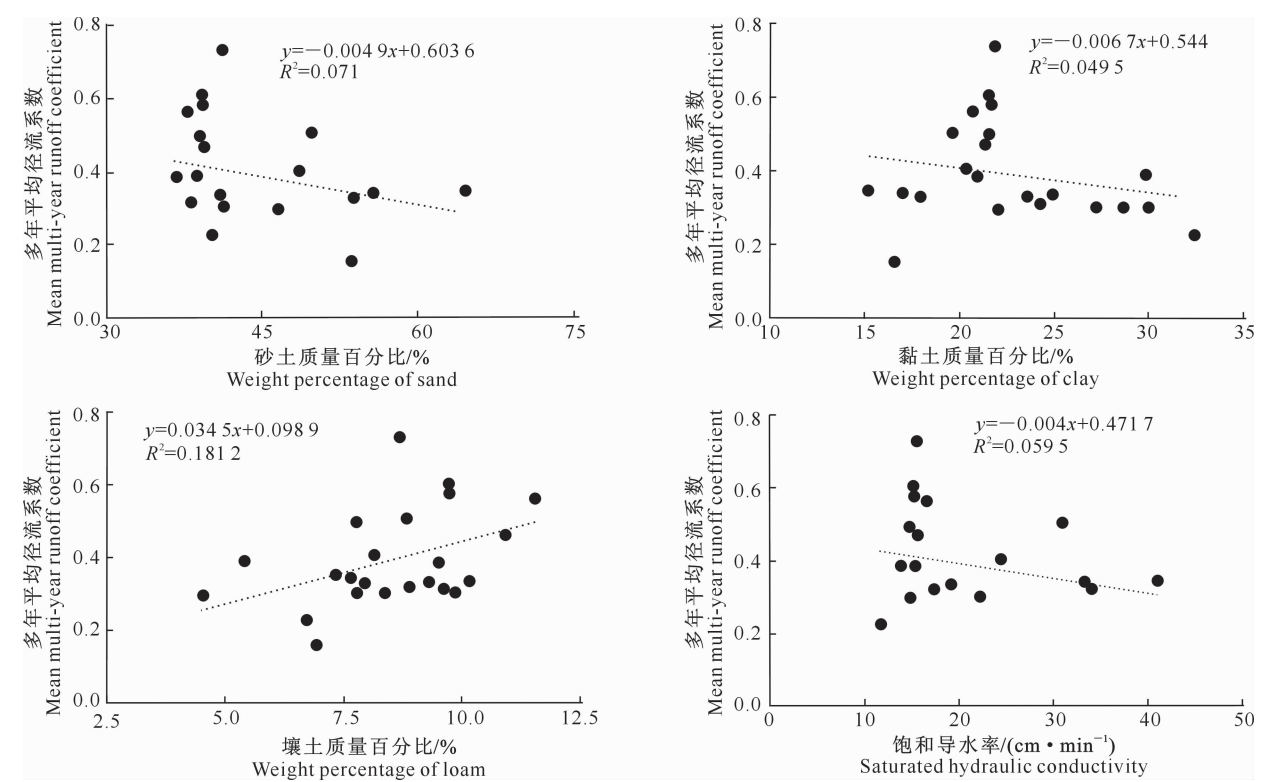


图 4 淮河上游 23 个小流域多年平均径流系数与各类土壤质量百分比和饱和导水率的关系

Fig. 4 Correlation between mean annual runoff coefficient and weight percentage contents of all soil types and saturated hydraulic conductivity of 23 small watersheds in the upper reaches of Huaihe River

3 结 论

研究发现,在研究区内,以地貌结构对多年平均径流系数影响最大。在流域地貌结构因子中,多年平均径流系数与平均坡度和面积高程积分关系最好,且均为正相关关系,确定性系数分别为 0.485 7 和 0.478 6。而在土地利用/覆盖方面,林地、耕地面积所占比例对多年平均径流系数有较大影响,其中林草地面积占比与流域多年平均径流系数呈正相关关系,耕地面积占比与流域多年平均径流系数呈负相关关系,确定性系数分别为 0.292 和 0.262 3。而在土壤条件方面,砂土、黏土、壤土质量百分比以及土壤饱和导水率与多年平均径流系数相关性均微弱。由此可见,在所有下垫面因子中,地形特征是影响流域多年平均径流系数的最主要因素。

本研究初步揭示了流域多年平均径流系数与地形地貌、土地利用/覆盖以及土壤等流域下垫面因子之间的关系,但本研究只是将地形地貌特征、土地覆盖和土壤条件 3 个方面分离并分别研究其对多年平均径流系数的影响,而很多时候这些因子之间都是相互影响的,例如植被覆盖变化也会影响土壤含水量等。另外,流域的径流响应特征还受其他诸多因素的控制,如气候气象驱动条件以及人类活动(水利工程建设、水资源开发利用)等,这些在未来的研究中都有待讨论。

〔参考文献〕

- [1] 芮孝芳,蒋成煜.流域水文与地貌特征关系研究的回顾与展望[J].水科学进展,2010,21(4):444-449.
Rui X F, Jiang C Y. Watershed hydrology and retrospect and prospect of study on the relationship between the topographical features[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 444-449.
- [2] Anderson M, Burt T P. The role of topography in controlling throughflow generation[J]. Earth Surface Processes, 1978, 3(2): 331-344.
- [3] Beston R P, Marius J B. Source area of storm runoff[J]. Water Resources Research, 1969, 5(3): 574-582.
- [4] Freeze R A. Role of subsurface flow in generating surface runoff; 2. Upstream source areas[J]. Water Resources Research, 1972, 8(5): 1272-1283.
- [5] Smith R E, Hebbert R H B. Mathematical simulation of interdependent surface and subsurface hydrologic processes[J]. Water Resources Research, 1983, 19(4): 987-1001.
- [6] 刘金涛,王爱花,韦玉,等.流域地貌结构因子对径流特征的影响分析[J].水科学进展,2015,26(5):631-638.
Liu J T, Wang A H, Wei Y, et al. Watershed geomorphology structure factor's influence on runoff characteristic analysis [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(5): 631-638.
- [7] 林凯荣,何艳虎,陈晓宏.土地利用变化对东江流域径流量的影响[J].水力发电学报,2012,31(4):44-48.
Lin K R, He Y H, Chen X H. Land use change on the influence of the Dongjiang river basin runoff [J]. Journal of Hydroelectric Power, 2012, 31(4): 44-48.
- [8] Ferreira C S S, Ferreira A J D, Pato R L, et al. Rainfall-runoff-erosion relationships study for different land uses in a sub-urban area [J]. Zeitschrift Für Geomorphologie, 2012, 56(3): 5-20.
- [9] 樊艺峰.土壤饱和导水率研究现状分析[J].山西水利,2011,27(5):43-44,60.
Fan Y F. Soil saturated hydraulic conductivity research present situation analysis [J]. Journal of Water Conservancy in Shanxi, 2011, 27(5): 43-44, 60.
- [10] 吴夏懿,张志才.贵州省岩溶地区年径流系数受下垫面影响的分析[J].水电能源科学,2014(5):6-9.
Wu X Y, Zhang Z C. In Guizhou karst region affected by the underlying surface runoff coefficient analysis [J]. Journal of Hydropower Energy Science, 2014(5): 6-9.
- [11] 钟志农.地理信息系统原理及应用[M].北京:国防工业出版社,2013.
Zhong Z N. The principle and application of geographic information system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [12] 何隆华,赵宏.水系的分形维数及其含义[J].地理科学,1996,12(2):124-128.
He L H, Zhao H. The fractal dimension of river networks and its interpretation [J]. Journal of Geographical Science, 1996, 12(2): 124-128.
- [13] Strahler A N. Hypsometric (Area-Altitude) analysis of erosional topography [J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1952, 63(11): 1117-1142.
- [14] 常直杨,王建,白世彪,等.面积高程积分值计算方法的比较[J].干旱区资源与环境,2015,29(3):171-175.
Chang Z Y, Wang J, Bai S B, et al. Area elevation comparing the calculation methods of integral value [J]. Journal of Arid Zone Resources and Environment, 2015, 29(3): 171-175.
- [15] 牛最荣,赵文智,刘进琪,等.甘肃渭河流域土地利用及覆被变化对径流的影响研究[J].水利水电技术,2012,43(4):139-142.
Niu Z R, Zhao W Z, Liu J Q, et al. Study on impact from change of land-use and land-cover on runoff in Weihe River Basin in Gansu province [J]. Water Resources and Hydro-power Engineering, 2012, 43(4): 139-142.
- [16] Saxton K E, Rawls W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1569-1578.

[13] 金明哲,郑建立,裴旭明,等. 应用于物联网的 Linux 云端服务器设计 [J]. 信息技术,2015(9):179-183.
Jin M Z, Zheng J L, Pei X M, et al. Design of Linux cloud server application in the internet of things [J]. Journal of Information Technology, 2015(9): 179-183.

[14] Qiu X B, Zhou Y. Binary image segmentation based on optimized parallel K-means [J]. British Journal of Anaesthesia, 2015, 103(6): 783-785.

[15] Ma G Q, Wang X J. An efficient algorithm optimization of CT images segmentation based on K-means clustering [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 530/531: 386-389.

[16] 王丹丹,徐 越,宋怀波,等. 融合 K-means 与 Ncut 算法的无遮挡双重叠苹果目标分割与重建 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 227-234.
Wang D D, Xu Y, Song H B, et al. Fusion of K-means and Ncut algorithm to realize segmentation and reconstruction of two overlapped apples without blocking by branches and leaves [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 227-234.

[17] 李 牧,闫继红,李 戈,等. 自适应 Canny 算子边缘检测技术 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(9): 1002-1007.
Li M, Yan J H, Li G, et al. Self-adaptive Canny operator edge detection technique [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(9): 1002-1007.

[18] Mokrzycki W, Samko M. Canny edge detection algorithm modification [C]//International conference on computer vision and graphics. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2012: 533-540.

[19] Wang M, Jin J S, Jing Y, et al. The improved Canny edge detection algorithm based on an anisotropic and genetic algorithm [C]//Advances in image and graphics technologies. Beijing: Springer, 2016: 115-124.

[20] 李文勇,李 明,钱建平,等. 基于形状因子和分割点定位的粘连害虫图像分割方法 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 175-180.
Li W Y, Li M, Qian J P, et al. Based on the shape factor and adhesion of the segmentation point positioning pest image segmentation method [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2015, 31(5): 175-180.

[21] 杨蜀秦,宁纪锋,何东健. 基于 Harris 算子的籽粒尖端识别方法 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 166-169.
Yang S Q, Ning J F, He D J. Identification of tipcap of agricultural kernel based on Harris algorithm [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 166-169.

[22] 周志艳,闫梦璐,陈盛德,等. Harris 角点自适应检测的水稻低空遥感图像配准与拼接算法 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 186-193.
Zhou Z Y, Yan M L, Chen S D, et al. Image registration and stitching algorithm of rice low-altitude remote sensing based on Harris corner self-adaptive detection [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 186-193.

[23] Wan L, Yu Z M, Yang Q H. Corner detection algorithm with improved Harris [C]// Advances in image and graphics technologies. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015: 260-271.

(上接第 147 页)

[17] 薛丽芳,谭海樵. 沂河流域水文特征变化及其驱动因素 [J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1354-1360.
Xue L F, Tan H Q. Yihe watershed hydrological characteristics change and its driving factors [J]. Journal of Geographical Science, 2011, 30(11): 1354-1360.

[18] 荣艳淑,周 云,王 文. 淮河流域蒸发皿蒸发量变化分析 [J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 15-22.
Rong Y S, Zhou Y, Wang W. Changes in Huaihe river basin e-vaporation pan evaporation analysis [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(1): 15-22.

[19] Lee J, Pak G. Effects of land use change and water reuse options on urban water cycle [J]. Journal of Environment Sciences, 2010, 22(6): 923-928.

[20] 郑 璟,方伟华,史培军,等. 快速城市化地区土地利用变化对流域水文过程影响的模拟研究:以深圳市布吉河流域为例 [J]. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1560-1572.
Zheng J, Fang W H, Shi P J, et al. Rapid urbanization areas of land use change on the influence of watershed hydrological processes simulation studies: Shenzhen Buji river basin, for example [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(9): 1560-1572.

[21] 何其华,何永华,包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化 [J]. 山地学报, 2003, 21(2): 149-156.
He Q H, He Y H, Bao W K. Drought happened in mountain soil moisture dynamic change [J]. Journal of Mountain, 2003, 21(2): 149-156.

[22] 范姝云. 土壤水分动态对林地地表径流的影响概况 [J]. 绿色科技, 2015(4): 1-2, 6.
Fan S Y. Soil moisture dynamic impact on forest land surface runoff survey [J]. Journal of Green Science and Technology, 2015(4): 1-2, 6.