

基于微地形的南方沟-塘湿地系统景观异质性研究

——以凤岭流域为例

皋鹏飞, 李玉凤, 刘红玉, 季 香, 孙一鸣, 李玉玲

(江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 本文以 Quickbird 遥感影像和 DEM 为基础, 利用 GIS 技术和实地调查相结合, 并通过 SPSS 数据分析软件, 对仪征市凤岭流域的地形、沟-塘湿地系统网络结构及其空间异质性进行研究。结果表明: ①流域以微地形为主要特征, 但在平均坡度、平均剖面曲率、平均高程变异系数上依然存在明显的差异性。据此划分的 3 个地形特征区域 A、B、C 的地形复杂度依次降低。②不同地形特征区域内水塘与沟渠的景观结构特征存在着差异。3 个地形特征区域的水塘在单位面积水塘面积指标上差异不显著, 在单位面积水塘库容、密度、聚合度、聚集度指标上差异显著, 总体地形特征越简单的区域, 其水塘结构特征越复杂; 3 个地形特征区域的沟渠在环度、连通度指标上差异不显著, 在单位面积沟渠数、单位面积沟渠节点数、密度和线点率指标上差异显著, 总体地形特征越复杂的区域, 其沟渠结构特征越复杂。③不同地形特征区域内沟-塘湿地系统景观结构特征存在着差异。3 个地形特征区域沟-塘湿地系统在连接率指标上差异不显著, 在线面率、可达性总成本指标上差异显著, 总体地形特征越复杂的区域, 其结构特征越复杂。通过分析研究区域的地形、沟-塘湿地系统景观结构及其异质性, 能够更好地优化设计不同地形特征区域的沟-塘湿地系统, 合理分配水资源。

[关键词] 微地形特征, 沟-塘湿地系统, 网络结构, 凤岭流域

[中图分类号] P951 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2016)02-0112-08

Study of the South Ditch-Pond Wetland Landscape Heterogeneity Based on Micro-Topography

——A Case Study of Fengling Watershed

Gao Pengfei, Li Yufeng, Liu Hongyu, Ji Xiang, Sun Yiming, Li Yuling

(Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, School of Geography Science,
Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Based on Quickbird remote sensing image and DEM, using GIS technology and combined with field survey, through the SPSS data analysis software to research on the topography, ditch-pond wetland system network structure and spatial heterogeneity of the Fengling watershed in Yizheng are studied. The results show that: ①The main feature of the watershed is micro-topography, but in the average degree of slope, the average profile curvature, the variation coefficient of average elevation still exist obvious differences. On the basis of three characteristics of A, B, C, the terrain complexity is decreased in turn. ②In different feature areas, the landscape structure characteristics of ponds and ditches are different. Among the three regions, the index of the area of ponds in the unit area has no significant difference, but the indexes of capacity in the unit area, density, aggregation, cohesion have significant difference, overall, the region which topographic features are simpler, the network features of ponds are more complex; Ditches in the indexes of degree of ring, connected have no significant difference, but the indexes of number in the unit area, node number in the unit area, density and line rate have significant difference, overall, the region which topographic features are more complex, the network

收稿日期: 2015-09-15.

基金项目: 国家自然科学基金(41401205、31570459)、江苏省自然科学基金(15KJA170002、BK20140921)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(164320H116)。

通讯联系人: 皋鹏飞, 硕士研究生, 研究方向: 湿地景观生态学. E-mail: 1574747333@qq.com

features of ditches are more complex. ③In different feature areas, the landscape structure characteristics of the ditch-pond wetland system are different. Among the three regions, the index of connection rate has no significant difference but the indexes of line and plane rate, up to total cost have significant difference, overall, the region which topographic features are more complex, the network features are more complex. Through the analysis of the topography, the ditch-pond wetland system landscape structure and its heterogeneity, it can be better to design the ditch-pond wetland system in different areas, and distribute the water resources efficiently.

Key words: micro topography, ditch-pond wetland system, network structure, Fengling watershed

南方沟-塘湿地系统是指多而小的水塘通过水沟相连形成的湿地系统,它作为一种特殊的人工湿地,是我国存在 3 000 多年的典型农业小水利工程,广泛分布于我国东部和南部地区^[1-2]. 沟-塘湿地系统作为农村景观组分,能够显著地降低径流速度、贮存降水及暴雨径流,其所蓄积的水资源在灌溉期回归农田,得以循环利用. 因此,沟-塘湿地系统能够有效地拦截、去除农业景观输出的营养物质,改善流域水环境,在农业发展过程中具有不可替代的作用和价值^[3-5]. 这些研究成果为我们认识沟-塘湿地系统提供了坚实的基础. 目前对于沟-塘湿地系统的研究多集中在生态系统尺度上,将水塘或者沟渠作为离散的个体去研究内部的结构与功能,且主要集中在对非点源污染物的去除效应^[6]、对水文格局的影响^[7]、对景观造成的破碎化上^[8],而缺少在景观尺度上,将水塘和沟渠的连通作为一个整体的系统,开展微地形特征与沟-塘湿地系统景观结构的研究. 风岭流域由于农业灌溉的需要,区域内沟-塘湿地系统很发达,沟渠和水塘形成了整个流域内的沟-塘景观网络系统. 而研究区内的沟-塘湿地系统子流域之间由于不同的微地形特征,使得沟-塘湿地系统的空间结构存在着很大的差异,这为本文提供了理想的研究区域. 本文通过分析微地形特征来刻画沟-塘湿地系统的空间结构特征,将有利于更好地认识沟-塘湿地系统水资源利用过程及其生态效应,对于湿地的研究、农业的开发等具有重要的意义.

1 研究区概况

高宝邵伯湖位于江苏省中部,总面积 876.76 km²,是江苏省第三大湖,淮水入江的主要通道,年平均水深 1.46 m. 研究区风岭流域位于江苏省仪征市(见图 1),在高宝邵伯湖的西南部,是一个相对封闭的小流域,流域高程变化范围为 20 m~50 m,流域面积为 17.31 km². 研究区土地利用类型主要包括林地、建设用地、水域湿地以及耕地. 气候属于亚热带季风气候,年平均气温 15 ℃,降雨丰沛,年降水量 1 042.50 mm,降雨主要集中在 6 月-9 月,占全年降雨量的 59.20%. 土壤类型以黄褐土和水稻土为主^[9-10]. 该区为典型的一年两季的耕作模式,6 月-10 月为水稻种植期,11 月到次年 5 月为冬小麦种植期. 上世纪 60 年代-70 年代,为了区域内抗旱、防洪排涝,改良低洼易涝的盐碱地,开始了大规模的水利设施建设. 因此在风岭流域区域内分布了大规模的沟-塘湿地系统.

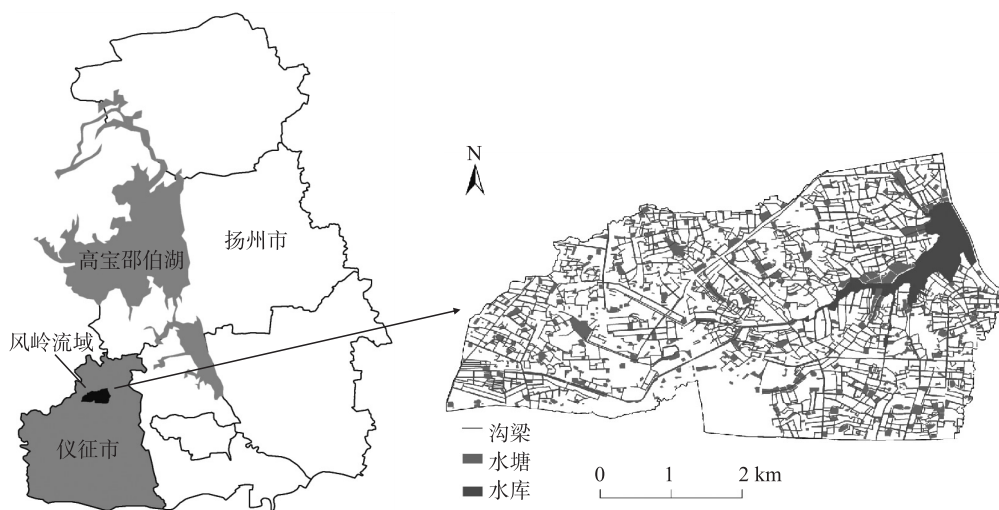


图 1 研究区示意图

Fig.1 The location of the study area in Yizheng

2 数据来源及研究方法

2.1 区域地形特征信息提取

沟-塘湿地系统是典型的半人工湿地系统,区域水循环的作用使得该系统具有可持续性.作为半人工的可持续系统,其在建设和变迁过程中与该区的微地形特征密不可分.因此,揭示研究区的微地形特征,并对其进行分类是揭示沟-塘湿地系统的基础.由于沟-塘湿地系统在降雨汇流的过程中是以小流域为基本单元,因此在地形特征分析的过程中也以小流域为基本单元.小流域的划分主要是根据风岭流域水文运移路径(出水口位置、水流方向)确定子流域的边界^[11-13].具体过程是在确保流域沟-塘湿地系统的完整和连续的情况下,以DEM为基础,利用ArcGIS10.2的水文分析模块,得到水流方向、汇流累积量、河网的分布等水文因子,根据实际的地形,经过大量的实验对比,当阈值为1500时,河网的分布与实际的河网最为接近,因此确定以最佳阈值1500划分出35个子流域.地形指标(terrain parameters)是指用以描述地表形态,并能在DEM表面的各点直接或间接计算的参数或指标.地形指标将复杂的地表形态特征和水文特征量化地描述,为地表分析和模拟提供了依据^[14-17].在地形指标中,平均坡度、平均坡面曲率以及平均高程变异系数均能够较好地反映出风岭流域地形起伏程度等微地形的特征,对景观结构具有重要影响.因此本文选取平均坡度、平均坡面曲率以及平均高程变异系数3个指标.坡度指标可以对流域的地形梯度特征进行量化.坡度表示了地表面在该点的倾斜程度,是决定降雨空间再分配和地表水流流向的重要地形因子^[18-19],其单位为:度.坡面曲率指地面上的某点的地表坡度变化率,它是影响垂直方向坡形变化的主要因子,对区域地形有很好的指示意义^[20-21],其单位为:度.平均高程变异系数是反映分析区域内地表单元格网各顶点高程变化的指标,反映地面的地形起伏程度^[22-23].35个子流域的平均坡度和平均坡面曲率的计算均通过Spatial Analyst工具下的表面分析,输入DEM,高程系数取0.001而得.平均高程变异系数的计算可以通过DEM提取出格网单元顶点的标准差与平均高程,它们的比值就是高程变异系数.为了便于研究,更加清晰地看出流域的微地形特征差异,在提取出的地形指标的基础上,利用SPSS17.0系统聚类的方法对35个子流域进行聚类分析,得到3个地形特征差异显著的特征区域.

2.2 沟-塘湿地系统信息提取

本文数据源来自Quickbird遥感影像,其分辨率为0.61 m.利用ArcGIS10.2软件对遥感影像进行人工解译,其空间地理坐标系统采用WGS-1984.由于田间沟渠较为复杂,因此在人工解译过程中,配合反复野外校验得到研究区沟-塘湿地系统数据库,其沟-塘数据解译精度达到90%以上.用于刻画研究区地形的数据主要是购自江苏省测绘局的DEM数据,其精度为5 m×5 m.

2.3 沟-塘湿地系统结构指标选择与计算

2.3.1 水塘结构特征指标选取

水塘斑块在流域内具有重要的作用,它是连接沟渠网络结构的纽带.为了反映其结构组成和空间配置,本文选取了合适的景观指数来进行描述:单位面积水塘面积(AE)、单位面积水塘库容(V)、密度(PD)、聚合度(AI)、聚集度(COS).单位面积水塘面积(AE)是区域内单位面积上水塘斑块的面积之和,不同特征区域单位面积上具有不同的水塘面积,其所服务的沟渠结构具有差异性,其单位为:km²,其值的变化范围为AE>0.单位面积水塘库容(V)是衡量区域内单位面积上水塘的存水量的指标,单位为:10⁸ m³,通过3D Analyst分析模块下的表面体积功能提取水塘的库容^[24-25].密度(PD)是景观结构分析的基本指数,水塘的密度用单位面积上的水塘总面积来表示,其计算公式为:PD=TN/TA,其中,TN为水塘的总个数,TA为区域总面积,单位:个/km².聚合度(AI)描述的是景观中水塘之间的自然衔接程度,其值越大,表明斑块之间的相邻衔接程度越高,范围:0<AI≤100.聚集度(COS)是用来衡量水塘斑块类型的结合程度,代表相应的斑块类型的自然连通性,该值随斑块类型结合程度的增加而增大,取值范围:0≤COS<100.水塘聚合度和聚集度的结果均通过Fragstats 3.3软件计算而得.

2.3.2 沟渠结构特征指标选取

沟渠结构特征用单位面积沟渠数(L)、单位面积沟渠节点数(V)、密度(QD)、环度(A)、连通度(C)和线点率(B)来表示.单位面积沟渠数(L)是区域内单位面积上所有沟渠条数的总和,不同特征区域单位面积上具有不同的沟渠条数,其单位为:条/km².单位面积沟渠节点数(V)是沟渠与沟渠之间的交点,单位:个/km².密

度指数是用单位面积上的沟渠总长度来表示,单位:km/km²,计算公式为: $QD=S/A$,其中, S 为沟渠总长度, A 为流域面积.环度(A)是用来反映沟渠网络结构的复杂程度的指标^[26],其指数的计算公式为: $A=(L-V+1)/(2V-5)$,其中, L 为连接沟渠数, V 为节点数, A 值的变化范围为0~1.当 $A=0$ 时,表示沟渠网络无环路;当 $A=1$ 时,表示沟渠网络具有最大可能的环路数.连通度(C)是用来描述网络中所有节点被连接的程度,即一个网络中连接沟渠数与最大可能连接沟渠数之比,常用 C 指数测度: $C=L/3(V-2)$, C 指数的变化范围为0~1. C 为0时,表示没有节点相连,网络连通性最低; C 为1时,表示每个节点都彼此相连,网络连接度最高.线点率(B)是指网络中每个节点的平均连接数,计算公式为: $B=L/V$, B 指数的数值范围为0~3. $B=0$,表示无网络存在; B 值增大,表示网络内每一节点的平均沟渠连接数增加,网络复杂性增强^[27].

2.3.3 沟-塘湿地系统结构特征指标选取

水塘与水塘之间通过沟渠连接成为一个网络,为了反映沟-塘湿地系统的空间结构特征,选取连接率(CT)、线面率(F)、可达性总成本(AC)作为沟-塘湿地系统的结构指标.连接率(CT)是沟-塘湿地系统中能够连接沟渠的水塘数目和所有水塘数目的比值,能够反映系统中沟渠和水塘之间的连接程度,其计算公式为: $CT=N/TN$,其中, N 为连接沟渠的水塘数目, TN 为总的水塘数目.线面率(F)是指沟-塘湿地系统中的水塘平均连接的沟渠数目,能够反映系统中沟-塘湿地系统结构的复杂性以及水塘的有效使用程度,其计算公式为: $B=M/N$,其中, M 为连接水塘的沟渠数目, N 为连接沟渠的水塘数目.可达性总成本(AC)是指沟-塘湿地系统中水资源从一个水塘到达另一个水塘的通畅程度,通过水塘之间的沟渠网络节点作为路径的成本来表示,它能够反映系统中沟-塘湿地系统的连贯程度^[28],该指标数据通过 ArcGIS10.2 几何网络分析功能统计出其结果.

3 结果与分析

3.1 流域微地形特征分析

利用 ArcGIS10.2 水文分析模块以及实际的地形,经过大量的实验对比,划分出 35 个子流域,如图 2 所示.

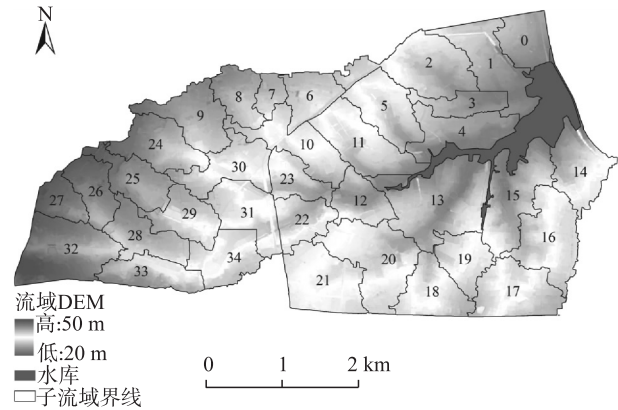


图2 风岭流域子流域空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of the sub-basin of the Fengling watershed

为了反映其微地形的特征,对 35 个子流域的平均坡度、平均坡面曲率、平均高程变异系数进行提取,如表 1,其坡度图如图 3 所示.据此利用 SPSS17.0 系统聚类方法对其进行聚类分析得到 3 种类型的地形特征区域,如图 4.

表1 风岭流域地形因子统计

Table 1 Statistical analysis of topographic factors of the Fengling watershed

特征区域	包含的子流域	平均坡度/(°)	平均坡面曲率/(°)	区域平均高程/m	平均高程变异系数
A	1、12、13、15、22、23、31、2、3、11	1.67 ^a ±0.32	0.01 ^a ±0.00	29.7±2.21	0.09 ^a ±0.01
B	0、4、5、10、16、17、18、19、20、24、25、29、30、32、33、34	1.43 ^b ±0.13	0.01 ^c ±0.00	34.9±4.37	0.07 ^b ±0.01
C	6、7、8、21、26、27、28、9、14	1.26 ^c ±0.29	0.01 ^c ±0.00	37.2±4.03	0.05 ^c ±0.03

同一列中的 a、b、c 表示差异显著.

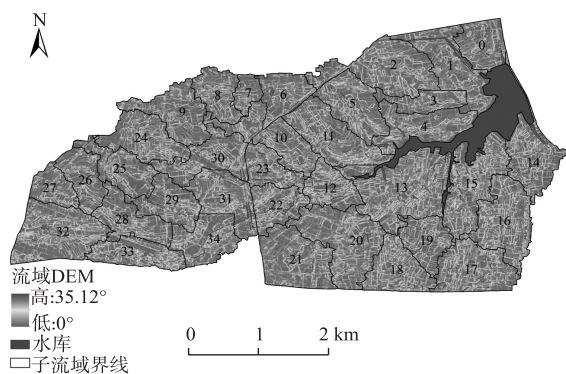


图3 风岭流域子流域坡度图

Fig.3 Slope of the sub-basin of the Fengling watershed

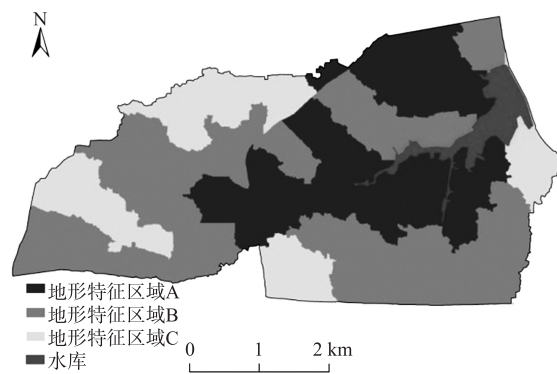


图4 风岭流域地形特征区域聚类分布图

Fig.4 The distribution of terrain feature areas of the Fengling watershed

从图4可以看出,区域A主要分布于风岭水库的周围,区域B围绕于A,区域C位于区域的最外围.从表1可以看出,区域A的平均坡度为 $(1.67 \pm 0.32)^\circ$,区域B平均坡度为 $(1.43 \pm 0.13)^\circ$,区域C的平均坡度为 $(1.26 \pm 0.29)^\circ$,3个区域的平均坡度相差较大,且呈现递减的趋势;3个区域的平均坡面曲率均为 $(0.01 \pm 0.00)^\circ$,这说明每个区域的坡度变化率相差不大;平均高程变异系数层面上,区域A的系数值为 0.09 ± 0.01 ,区域B的系数值为 0.07 ± 0.01 ,区域C的系数值为 0.05 ± 0.03 ,区域C是3个区域中平均高程系数最低的区域,这说明区域C的地形起伏程度相对于A和B更小,地形更加平缓,地形特征最简单;区域A的地形起伏程度最大,地形特征最复杂;区域B次之,地形特征较复杂.

同时利用SPSS17.0中的ANOVA方差分析进行不同的区域微地形特征差异的显著性检验,如表1.验证表明风岭流域的不同区域在平均坡度、平均坡面曲率、平均高程变异系数等地形因子的统计上均存在明显的差异.具体表现为:地形特征区域A、B、C的地形复杂度依次降低,差异显著.在地形复杂度上为其定义3种地形特征:地形特征最复杂的特征区域A、地形特征较复杂的特征区域B和地形特征最简单的特征区域C.

3.2 不同地形特征区域沟-塘湿地系统景观结构特征分析

3.2.1 不同地形特征区域内水塘景观结构特征

整个流域内具有水塘626个,平均面积 0.0028 km^2 /个,总面积约 1.75 km^2 ,占流域总面积10.11%,水塘库容总量约为 $146.60 \times 10^8 \text{ m}^3$.3个不同的地形特征区域中,风岭流域水塘的景观结构特征如图5.水塘是连接沟渠网络的纽带,同时也具有为周围的农田汇水和排水的功能.从图5可以看出,对于水塘的景观结构指标:单位面积水塘面积、单位面积水塘库容、密度、聚合度、聚集度而言,地形特征区域A、B、C的单位面积水塘面积均为 0.10 km^2 ,差异不显著;单位面积水塘库容分别为 $5.05 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 、 $8.86 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 、 $12.77 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,呈现递增的趋势;地形特征区域A、B、C的水塘密度分别为 $34.73 \text{ 个}/\text{km}^2$ 、 $36.67 \text{ 个}/\text{km}^2$ 、 $37.18 \text{ 个}/\text{km}^2$,同样呈现递增的趋势,表明地形特征区域C内的水塘斑块最为密集,破碎度高,其次为地形特征区域B与地形特征区域A;水塘的聚合度分别为72.80、76.86和79.37,聚集度分别为85.23、86.69和86.81(图5),数据表明地形特征区域C的水塘分布较为聚集,水塘之间自然衔接程度高,其次为地形特征区域B和地形特征区域A.

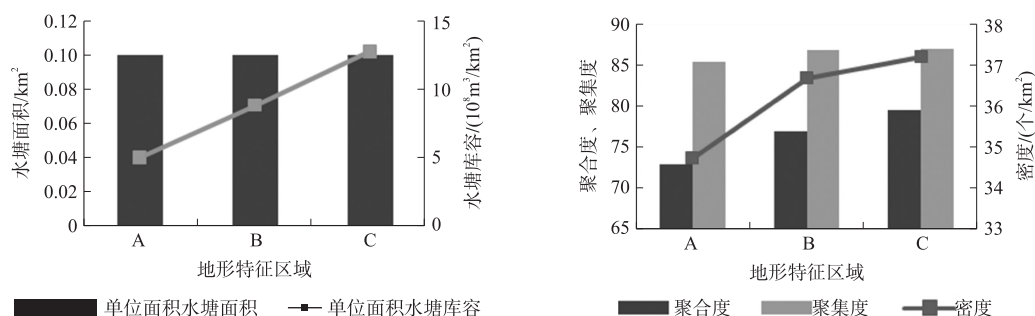


图5 风岭流域不同地形特征区域水塘景观结构特征

Fig.5 The landscape structure characteristics of ponds in different terrain feature areas of the Fengling watershed

同时利用 SPSS17.0 中的 ANOVN 方差分析对水塘景观结构指标之间的数值进行差异显著性检验,验证表明不同的地形特征区域其水塘景观结构特征存在明显差异.具体表现为:在单位面积水塘面积指标上,3 个地形特征区域差异不显著;在单位面积水塘库容、密度、聚合度、聚集度 4 个指标上,3 个地形特征区域差异性显著.总体看来,在地形特征区域内水塘景观结构的复杂性上,地形特征最简单的特征区域 C 最高,地形特征较复杂的特征区域 B 次之,地形特征最复杂的特征区域 A 最低.即随着地形特征的复杂化,水塘景观结构特征越简单.

3.2.2 不同地形特征区域内沟渠景观结构特征

整个流域内具有沟渠 3 277 条,平均长度 0.094 1 km/条,总长约 308.21 km,平均沟渠密度为 17.81 km/km². 3 个不同的特征区域中,风岭流域沟渠的景观结构特征如图 6.

从图 6 可以看出,对于沟渠的景观结构指标:单位面积沟渠条数、单位面积沟渠节点数、密度、环度、连通度、线点率而言,地形特征区域 A、B、C 的单位面积沟渠条数分别为 201 条/km²、186 条/km²、179 条/km²;单位面积沟渠节点数分别为 153 个/km²、147 个/km²、144 个/km²,呈现递减的趋势;地形特征区域 A 的沟渠密度、环度、连通度和线点率分别为 18.86 km/km²、0.16、0.44 和 1.31;地形特征区域 B 的沟渠密度、环度、连通度和线点率分别为 18.02 km/km²、0.13、0.42 和 1.26;地形特征区域 C 的沟渠密度、环度、连通度和线点率分别为 15.66 km/km²、0.10、0.40 和 1.18. 数据表明地形特征区域 A 的沟渠分布最为密集,沟渠的环路和网络节点被连接的程度均为最高,网络复杂性最强,其次为地形特征区域 B 和地形特征区域 C.

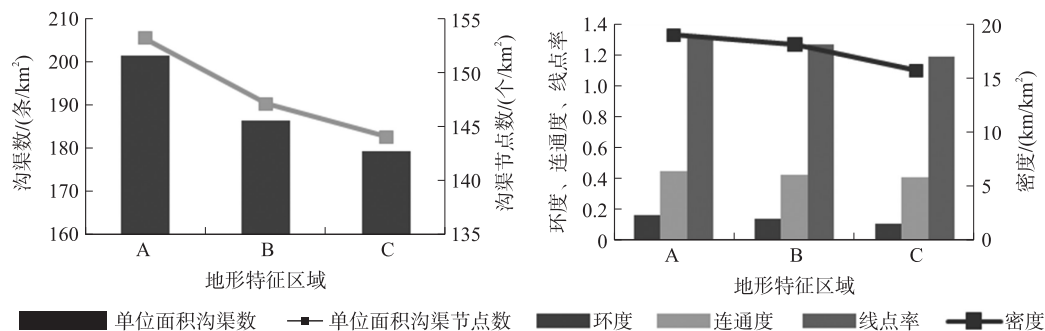


图6 风岭流域不同地形特征区域沟渠景观结构特征

Fig.6 The landscape structure characteristics of ditches in different terrain feature areas of the Fengling watershed

同时利用 SPSS17.0 中的 ANOVN 方差分析对沟渠景观结构指标之间的数值进行差异显著性检验,验证表明不同的地形特征区域其沟渠景观结构特征存在明显差异.具体表现为:在沟渠环度、连通度指标上,3 个地形特征区域差异不显著;在单位面积沟渠数、单位面积沟渠节点数、密度、线点率 4 个指标上,3 个地形特征区域差异性显著.

总体来看,在地形特征区域内沟渠景观结构的复杂性上,地形特征最复杂的特征区域 A 最高,地形特征较复杂的特征区域 B 次之,地形特征最简单的特征区域 C 最低,即随着地形特征的复杂化,沟渠景观结构特征越复杂.

3.2.3 不同地形特征区域内沟-塘湿地系统景观结构特征

区域中的沟渠和水塘是密不可分的,沟渠和水塘连接成为沟-塘湿地系统.沟-塘湿地系统在不同的微地形特征下存在特征差异.构建连接率、线面率、可达性总成本作为沟-塘湿地系统的结构指标,其结构特征如图 7.从图 7 可以看出,地形特征区域 A 中,连接沟渠的水塘数目为 133 个,占区域总水塘斑块数目的 70.00%,连接水塘的沟渠数目为 498 条,占区域总沟渠数的 45.31%;地形特征区域 B 中,连接沟渠的水塘数目为 208 个,占区域总水塘斑块数目的 68.42%,连接水塘的沟渠数目为 774 条,占区域总沟渠数

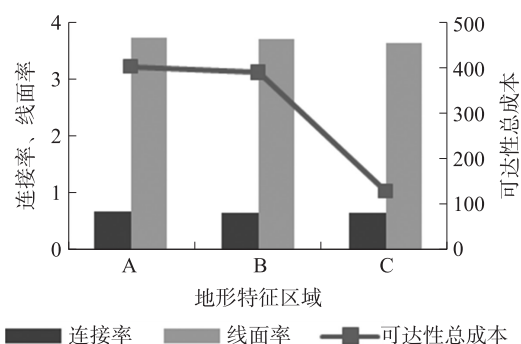


图7 风岭流域不同地形特征区域沟-塘湿地系统景观结构特征

Fig.7 The landscape structure characteristics of ditch-pond wetland system in different terrain feature areas of the Fengling watershed

的50.23%;地形特征区域C中,连接沟渠的水塘数目为88个,占区域总水塘斑块数目的66.67%,连接水塘的沟渠数目为321条,占区域总沟渠数的50.39%。对于表征沟-塘湿地系统复杂性的连接率和线面率、可达性总成本3个指标,特征区域A、B、C的连接率分别为0.70、0.68、0.67,线面率分别为3.74、3.72、3.65,可达性总成本分别为405、392和134。数据表明地形特征区域A中沟渠和水塘之间的连接程度最好,并且区域内每个水塘能够最大程度地得到利用,沟-塘湿地系统的复杂性最高,其次为地形特征区域B和地形特征区域C。

同时利用SPSS17.0中的ANOVA方差分析对沟-塘湿地系统景观结构指标之间的数值进行差异显著性检验,验证表明不同的地形特征区域的沟-塘湿地系统的景观结构特征存在明显差异。具体表现为:在沟-塘湿地系统连接率指标上,3个地形特征区域差异不显著;在沟-塘湿地系统线面率和可达性总成本指标上,3个地形特征区域差异性显著。总体来看,在沟-塘湿地系统景观结构的复杂性上,地形特征最复杂的特征区域A最高,地形特征较复杂的特征区域B次之,地形特征最简单的特征区域C最低,即随着地形特征的复杂化,水塘与沟渠之间的连接程度越来越高,沟-塘湿地系统的景观结构特征越复杂。

4 结语

4.1 结论

为了定量评价微地形特征和沟-塘湿地系统结构上的联系,本文将反映流域微地形特征的地形因子以及反映水塘、沟渠、沟-塘湿地系统的结构指标进行了分析。通过分析可以得出如下结论:

①风岭水库流域相对高程范围在20 m~50 m,具有大规模的沟-塘湿地系统,不同的地形特征区域在平均坡度、平均坡面曲率、平均高程变异系数等地形因子的统计上均存在明显的差异。其中地形特征区域A的地形起伏程度最大,地形特征最复杂,地形特征区域B次之,地形特征较复杂,地形特征区域C的地形起伏程度最小,地形特征最简单。②不同地形特征区域内水塘、沟渠的景观结构特征均具有差异性。水塘在单位面积水塘面积、单位面积水塘库容、密度、聚集度和聚合度指标反映的结构特征中,地形特征最简单的特征区域C的复杂性最高,地形特征最复杂的特征区域A的复杂性最低,即随着地形特征的复杂化,水塘景观结构特征越简单;沟渠在单位面积沟渠数、单位面积沟渠节点数、密度、环度、连通度和线点率指标反映的结构特征中,地形特征最复杂的特征区域A的复杂性最高,地形特征最简单的特征区域C的复杂性最低,即随着地形特征的复杂化,沟渠景观结构特征越复杂。③不同地形特征区域内沟-塘湿地系统景观结构特征具有差异性。沟-塘湿地系统在连接率、线面率和可达性总成本3个结构指标反映的特征中,地形特征最复杂的特征区域A的结构特征最复杂,地形特征较复杂的特征区域B次之,地形特征最简单的特征区域C最低,即随着地形特征的复杂化,沟-塘湿地系统的景观结构越复杂。

4.2 讨论

①研究区风岭流域分布大量的沟渠和水塘,形成了整个流域内的沟-塘景观网络系统。本文在景观尺度上,将水塘和沟渠的连通作为一个整体的系统,开展微地形特征与沟-塘湿地系统的景观结构及其空间异质性的研究。与过去对于沟-塘系统研究的文献比较,本研究补充了其在景观尺度上,将水塘和沟渠作为整体去进行研究的缺失。②微地形特征影响沟-塘湿地系统的空间分布及其景观结构。对于水塘来说,在地形复杂的区域,地形起伏程度较大的地方不利于水塘的建设。相反,在地形起伏程度较小的区域利于水塘的建设,单位面积内水塘的分布较多,表现出的景观结构特征也要复杂。对于沟渠来说,在地形起伏程度较大的区域,沟渠表现出的网络连接路径的成本较高,在单位面积沟渠数、单位面积沟渠节点数、环度等指标表现出的景观结构比地形起伏程度较小的区域复杂。对于水塘与沟渠连接形成的沟-塘湿地系统来说,在地形起伏程度较大的区域,水塘数目较少,其利用程度较高,因此表现出的连接率、线面率和可达性总成本均较高,在地形起伏程度较小的区域表现出相反的趋势。③通过分析研究区的地形特征、沟-塘湿地系统结构的差异性,能够更好地优化设计分布于不同地形特征区域的沟-塘湿地系统,为水资源的合理分配提供了理论基础。④本文选取平均坡度、平均坡面曲率、平均高程变异系数等地形因子来描述研究区的微地形特征,具有一定的局限性,要对区域沟-塘湿地系统景观结构的分异特征进行更深层次的研究,还需要进一步选取较为全面的地形因子。

[参考文献]

- [1] 刘洋,付强,陆海明,等. 农业流域中不同类型水塘沉积物磷素状态及其环境意义[J]. 环境化学,2013,32(12):2 307-2 314.
- [2] 宋歌,孙波. 县域尺度稻麦轮作农田土壤无机氮的时空变化——以江苏省仪征市为例[J]. 农业环境科学学报,2008,28(2):636-642.
- [3] 涂安国,尹炜,陈德强,等. 多水塘系统调控农业非点源污染研究综述[J]. 人民长江,2009,40(21):71-73.
- [4] 姜凯. 水塘湿地截留和净化农业面源污染物特性研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- [5] 毛战坡,彭文启,尹澄清,等. 非点源污染物在多水塘系统中的流失特征研究[J]. 农业环境科学学报,2004,23(3):530-535.
- [6] BOULDIN J L, FARRIS J L, MOOREM T, et al. Vegetative and structural characteristics of agricultural drainages in the Mississippi Delta[J]. Landscapes environmental pollution,2004,132(3):403-411.
- [7] ARMSTRONG A C. Ditch: a model to simulate field conditions in response to ditch levels managed for environmental aims [J]. Agriculture, ecosystems and environment 2000,77(3):179-192.
- [8] 刘红玉,张世奎,吕宪国. 20 世纪 80 年代以来挠力河流域湿地景观变化过程研究[J]. 自然资源学报,2002,17(6):698-705.
- [9] 李玉凤,刘红玉,朱丽娟,等. 农村多水塘系统中污染物来源评价:以陈集镇为例[J]. 南京师大学报(自然科学版),2009,32(1):136-140.
- [10] 李玉凤,刘红玉,郝敬锋,等. 农村小流域景观结构与水质耦合关系分析:以仪征市陈集镇为例[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(1):15-19.
- [11] 王俊啟. 基于 1:1 万地形图的数字流域划分研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [12] 俞伟斌. 基于 DEM 的数字流域时空特征及提取研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [13] 程峥,李永胜,高微微. 基于 ArcGIS 的 DEM 流域划分[J]. 地下水,2011,33(6):128-130.
- [14] 李新艳. 流域土壤侵蚀评价地形指标体系及提取方法[D]. 西安:西北大学,2014.
- [15] MOORE I D, GRAYSON R, LADSON A. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications[J]. Hydrological processes, 1991,5(1):3-30.
- [16] OLAYA V. Basic land-surface parameters[J]. Development in soil science,2009,33(14):141-169.
- [17] 杨景春,李有利. 地貌学原理[M]. 北京:北京大学出版社,2005:18-19.
- [18] 原立峰,李发源,张海涛. 基于栅格 DEM 的地形特征提取与分析[J]. 测绘科学,2008,33(6):86-88.
- [19] 陈楠. 坡度提取的边缘效应研究[J]. 人民黄河,2014,36(11):85-89.
- [20] 蔡清华. 区域侵蚀地形因子的尺度效应研究[D]. 西安:西北大学,2009.
- [21] 张尧,樊红,李玉娥. 一种基于等高线的地形特征线提取方法[J]. 测绘学报,2013,42(4):574-580.
- [22] 代灵燕. 黄土高原严重水土流失区多尺度 DEM 地形因子分析[D]. 西安:陕西师范大学,2012.
- [23] 张婷. 基于 DEM 的陕北黄土高原多地形因子空间关联特征研究[D]. 西安:西北大学,2005.
- [24] 汪鹤卫. 大中型水库库容测量与库容计算[J]. 科技资讯,2015,13(3):50-51.
- [25] 杨延利. 基于 ArcGIS 计算水库库容的方法研究[J]. 现代测绘,2013,36(4):51-52.
- [26] FORMAN R T T. Some general principles of landscape and regional ecology[J]. Landscape ecology, 1995,10(3):133-142.
- [27] 卢涛,马克明,傅伯杰,等. 三江平原沟渠网络结构对区域景观格局的影响[J]. 生态学报,2008,28(6):2 746-2 752.
- [28] 黄梅. 珠江三角洲典型城市土地利用时空变化及驱动力研究[D]. 长沙:中南大学,2014.

[责任编辑:丁 蓉]