DOI: 10.5846/stxb202004120865
张丹红,王效科,张路,黄斌斌. 大比例尺土壤保持服务制图分级方法研究. 生态学报,2021,41(4):1391-1401.
Zhang D H, Wang X K, Zhang L, Huang B B. Research on the classification methods of ecosystem service of soil retention for large-scale choropleth mapping. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1391-1401.

大比例尺土壤保持服务制图分级方法研究

张丹红[1,2],王效科[1,2,*],张 路[1],黄斌斌[1,2]
1 中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085
2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:科学地编制生态系统服务空间分布图,有助于识别生态系统优先保护热点及空缺,能够为国土安全规划提供基础信息。但由于缺乏统一科学的生态系统服务分级方法,生态系统服务分布图的展示效果和制图效率都受到限制。不恰当的分级制图会误导决策者对生态系统服务空间分布特征的判断,增加生态保护决策的不确定性。以构建生态服务制图分级标准为目标,对我国 6 个典型县区的土壤保持服务数据展开 1:25 万比例尺制图分级案例研究。采用分级精度、面积均衡性、极差一致性、空间自相关一致性 4 个分级质量评价指标评价并比较了目前地图编制中常用的自然断点法、几何间隔法、累积比例法、等差法、分位数法 5 种分级算法的分级制图效果。结果表明,6 个县区有相似的土壤保持服务分布特征:低值区覆盖面积大,高值区覆盖面积小。各县区土壤保持服务制图最优分级方法有差异:延庆区、丰满区最优分级方法为自然断点法;永靖县、天山区、安宁市最优分级方法为累积比例法;富阳区最优分级方法为几何间隔法。各分级方法中,累积比例法在 6 个县区综合制图效果最优或接近最优,适用性最好,能够较好的刻画各县区的土壤保持服务空间分布特征。本文提出的分级评价方法及其结果,可为生态系统土壤保持服务制图规范化和自动化提供科学依据。

关键词:生态系统服务制图;地图分级方法;制图效果评价

Research on the classification methods of ecosystem service of soil retention for large-scale choropleth mapping

ZHANG Danhong[1,2], WANG Xaoke[1,2,*], ZHANG Lu[1], HUANG Binbin[1,2]
1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: Scientifically compiling the spatial distribution map of ecosystem services is helpful to identify hot spots and vacancies of ecosystem services, and can provide basic information for homeland security planning. However, due to the lack of a unified and scientific classification method of ecosystem service capacity, the display effect and mapping efficiency of ecosystem service distribution maps are limited. Inappropriately hierarchical mapping will mislead decision-makers to judge spatial patterns of ecosystem services and increase the uncertainty of ecological protection decisions. Aiming at constructing classification standards of ecological service mapping, a 1:250000 scale mapping classification case study was conducted on the soil retention data of six typical counties in China. Four classification quality evaluation indicators, including the Accuracy of Classification, the Areal Equality, the Equality of Value Ranges of Classes and the Spatial Autocorrelation Consistency, are used to evaluate and compare five classification methods commonly used in maps of ecosystem services, which are the Natural Breaks, the Equal Interval, the Geometric Interval, the Cumulative Ratio and

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0507303)
收稿日期:2020-04-12; **网络出版日期**:2020-12-25
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangxk@rcees.ac.cn

Quantile. The results show that the six counties have similar distribution of soil retention services: the low-value area has a large coverage area, but the high-value area has a small coverage area. There are differences in the optimal grading methods for soil retention service mapping among counties: the optimal grading method for Yanqing and Fengman is the Natural Breaks; the optimal grading method for Yongjing, Tianshan, and Anning is the Cumulative Ratio; for Fuyang, the Geometric Interval is the optimal. Among the various grading methods, the Cumulative Ratio has the best or near-optimal comprehensive mapping effect in 6 counties, and has the best applicability for describing the spatial patterns of soil retention service in each county properly. The classification criteria and results proposed in this paper can provide a scientific basis for standardization and automation of ecosystem soil retention service mapping.

Key Words: mapping ecosystem services; classification methods of cartography; cartographic effect evaluation

保护和提升生态系统服务是构建生态安全保障体系的重要内容。随着生态系统服务评估方法的深入,开源生态系统服务空间数据不断增加,对区域生态系统保护规划发挥了积极作用(http://www.ecosystem.csdb.cn)。生态保护规划决策不仅要考虑生态保护指标的空间分布,也要为社会经济发展预留一定空间,以此防止生态保护与经济发展冲突加剧,通常采取生态要素空间模拟和专家决策相结合的方法进行生态保护规划和决策。因此,如何科学、直观地呈现生态服务的空间重要性分布将对决策起到至关重要的作用。通过生态系统服务数据空间分布特征可视化直观展示,决策者可直接判读生态系统服务高值区和低值区及其空间位置,确保生态服务价值最高的区域可以被纳入保护范围。但由于受到地貌、气候、土壤、植被、区位和人类活动多种因素影响,生态系统服务空间分布比较破碎。Rebecka 曾报道,66% 生态系统服务制图单元是基于 0.01 km^2 或更小的粒度[1],如何既能够反映大范围生态系统服务趋势和规律,又保证具有很高的制图精度,充分显示各区域服务强度值的差异,这是生态系统服务制图综合过程中面临的最大挑战。

生态系统服务空间模拟结果通常是由各栅格中的连续数值表示的,难以直接用于空间保护规划,通过科学的制图分级将栅格数据综合成不同的级别,每一级分别用特定颜色展示,有助于实现空间数据可视化和信息获取的简化[2-4],反映出原有数据的关键分布信息,有效支持规划决策。目前生态系统服务分布图编制时,主要采用的分级方法有自然断点法[5-8],分位数法[9]和累积比例法[10-11]等,但在如何选择分级方法以及分级效果对比方面仍有不足。

分级方法是获取数据分布信息和决定制图质量的关键因素[12]。缺少科学依据的生态服务分级方法极大限制了生态服务要素在区域生态保护规划中的应用。为此,国内外学者对分级方法质量评价进行了大量研究。从 Jenks[13] 早期提出级内误差最小化来测量分级精度,分级方法质量评价逐渐朝多指标评价方向发展。目前常用的分级方法质量评价指标包括数理统计指标和空间指标。数理统计指标如分级精度[13-17]、信息熵[18-19]和相对信息熵 H_{rel} [20]等。空间指标如地理面积不均等程度指标[21-22]、空间自相关性指标[21-24]等。但不同分级方法下,综合统计指标和空间指标的多指标分级效果评价研究较少,目前分级质量评价中所用指标不统一,指标各有优劣。如分级质量评价中分级精度指标众多,党安荣分析了不同分级精度模型后认为陆效忠[16]提出的分级精度指标体系所考虑的因素及公式参数最完善[25],可以对分级精度进行更精确的评价。本文选取陆效忠 4 种分级精度指标中参数最完善的相对平均偏差分级精度指标,该指标排除了分级后各级数量累积误差和值域范围较大对误差计算的影响,更适用于数据量较大,值域范围较大的土壤保持服务强度数据分级精度评价。Armstrong 等采用了空间自相关系数指标评价分级方法[22,24]的空间自相关性,计算分级后的空间自相关性 Morans′ I,认为 Morans′ I 越大,则分级效果越好。但郭庆胜提出分级后的 Morans′ I 不一定越大越好,而应该与原始数据的空间自相关性保持一致[22],但未提出衡量空间自相关一致性的方法,所以,本研究建立空间自相关一致性指标评价分级方法反映原始数据的空间自相关性的程度。本研究对众多的分级评价指标进行筛选、综合和改进后构建适合土壤保持服务强度数据特征的分级效果评价指标,以我国 6 个典型县区的土壤保持服务强度数据库为基础,采用 5 种分级方法编制 1:25 万服务分布图,根据各分级方法分级质

量的比较研究,建立了生态系统服务制图分级方法的优选方法,以期为大比例尺相关生态系统服务制图提供选择分级方法的理论依据和方法。

1　研究方法

1.1　研究区域与数据来源

本研究采用土壤保持强度(t $hm^{-2}a^{-1}$)数据表示土壤保持服务功能,由修正的通用土壤流失方程[17]计算,时间为 2015 年,空间分辨率为 90m。为体现全国土壤保持强度的空间分布差异,选取中国不同区位的 6 个县区为研究区。分别为北京市延庆区(面积约 1994 km^2,土壤保持强度值域为 0—1246 t $hm^{-2}a^{-1}$)、吉林市的丰满区(面积约为 10601 km^2,土壤保持强度值域为 0—1872 t $hm^{-2}a^{-1}$)、云南省县级市安宁市(面积约为 1301 km^2,土壤保持强度值域为 0—2522 t $hm^{-2}a^{-1}$)、杭州市辖区富阳区(面积约为 1821 km^2,土壤保持强度值域为 0—4744 t $hm^{-2}a^{-1}$)、隶属甘肃省临夏回族自治州的永靖县(面积约为 1864 km^2,土壤保持强度值域为 0—1578 t $hm^{-2}a^{-1}$)、隶属乌鲁木齐市的天山区(面积约为 245 km^2,土壤保持强度值域为 0—118 t $hm^{-2}a^{-1}$)。

1.2　制图分级方法

本研究选择等差分级法、自然断点法、几何间隔法、分位数法和累积比例法等 5 种分级方法对土壤保持强度进行分级,5 种分级方法原理见表 1,结合制图尺度、分级科学性和可读性,分级数设置为 5 级。

表 1　分级方法及原理

Table 1　classification methods and principles

分级方法 Classification methods	分级方法原理 Principles of classification methods
等差分级法 Equal interval	按数值等距离间隔进行分级
自然断点法 Natural breaks	通过不断迭代计算分级,使得数据级内变异最小,级间变异最大
几何间隔法 Geometric interval	按照数值几何间距进行分级
累积比例法 Cumulative ratio	将数值从大到小累积,然后按累加总量的百分比设置分界点。本文设置的分界点为 25%, 50%,75%,90%。
分位数法 Quantile	按照各级面积相等进行分级

1.3　分级目标及定量指标

根据制图分级理论,分级应满足分级精度和信息量要求,结合土壤保持强度数据特征,构建的制图分级目标和定量指标如表 2 所示:

表 2　分级目标及定量指标

Table 2　Classification objectives and its quantitative indexes

分级目标 Classification objectives	意义 Significance	定量指标 Quantitative indexes
高分级精度 High classification accuracy	分级方法应有高分级精度,即量值相近的数据分到同一级别,保证各级内部数值的差异较小,以使分级反映数据分布特征。	分级精度
各级面积均衡 Evenness of areas across classes	分级后各级区域均衡的显示,可最大程度反映不同区域服务强度值的差异,提高信息传输效率;图面各级重量感均衡。	面积均等程度
各级服务强度极差均衡 Evenness of ranges of ecosystem service intensity across classes	各级服务强度极差均衡,可显示出不同区段服务强度的空间分布特征,避免某级别极差过小或过大造成的信息量损失;各级量值极差均衡,量值重量感均衡,符合读图习惯。	极差均衡性指标
空间自相关性与原始数据保持一致 Consistency between spatial autocorrelations after classification and before	分级应反映土壤保持强度空间分布特征。空间自相关性是重要的空间分布特征,分级前后应尽可能保持一致。	空间自相关一致性指标

1.4 分级方法评价指标

(1)分级精度 *AC* (Accuracy of classification)

AC 用平均相对偏差表示,即各级内平均相对变异之和与平均总相对变异之比。*AC* 指标值越大,则分级误差越小,分级精度越高[16]。公式如下:

$$AC(N,K) = 1 - \frac{\frac{1}{K}\sum_{j=1}^{k}\frac{1}{\overline{X_j}\,n_j}\sum_{i=1_j}^{n_j}|X_i - \overline{X_j}|}{\frac{1}{\overline{X}\cdot N}\sum_{i=1}^{N}|X_i - \overline{X}|} \tag{1}$$

式中, X_i 、$\overline{X_j}$ 和 $\overline{X}$ 分别表示 i 栅格 、j 级平均和总平均服务强度。k 表示分级数, N 、n_j 分别表示土壤保持强度总体和 j 级别栅格数。

(2)面积均等程度(Areal equality)

AE 指标描述分级面积均等程度,基于信息熵理论和制图视觉重量感,分级后各级面积越相等,分级质量越好。制图信息理论认为,分级后各级面积越均等,确定一个栅格级别归属的不肯定程度越大,所需要的信息量越大[19-20],分级效果越好,常用相对信息熵 H_{rel}[20] 比较当分级数确定情况下,各分级方法的分级信息量大小,即分级面积不均衡程度。同时,各级面积越均等,各级视觉重量感越均衡,分级效果越好[14,21-22],常用 GEA[21-22] 描述各级面积的不均衡性,将其变形后得 *GEAS* 描述各级面积的均等程度。将 H_{rel} 和 *GEAS* 组合构建 *AE* ,公式如下:

$$AE = \frac{\text{GEAS} + H_{\text{rel}}}{2} \tag{2}$$

$$H_{\text{rel}} = -\frac{\sum_{i=1}^{k} P_i \ln P_i}{\ln k} \tag{3}$$

$$\text{GEAS} = 1 - \max\left|\frac{i}{k} - \frac{1}{A}\sum_{j=1}^{i} A_j\right|, i = 1,\cdots,k \tag{4}$$

式中, k 为分级数, P 为各级内部栅格数与总数栅格数比值。i 为各级序号。A_j 、A 别为第 j 级和总栅格数, A_1 , ……, A_k 按升序排列。H_{rel}、GEAS 分别为相对信息熵[20] 和面积均等程度,取值范围在 0 和 1 之间,分级后,各级面积越均等越接近 1。

(3)极差均衡性指标 EVR(Equality of value ranges of classes)

该指标描述分级后各级服务强度极差的均等程度。对于数值连续且分布不均衡的土壤保持强度数据,追求分级面积均衡可能导致各级服务强度极差差异较大。而分级后各级的服务强度极差重量感均衡,符合读图者的习惯。且从信息量角度,量值几乎相近的栅格数据划分为不同的级别造成级别信息冗余,而同一级别服务强度值范围很大则量值信息过度综合,造成信息量损失。因此,本文通过基于视觉重量感的不均等程度指标 GEA[21-22] 和基于信息论的相对信息熵指标 H_{rel} 变形为视觉重量感均衡程度指标 GEAS_{IE} 和 $H_{\text{rel}IE}$ 组合构建极差均衡性指标 EVR,将各级服务强度极差带入公式计算极差的均衡性。公式如下:

$$\text{EVR} = \frac{\text{GEAS}_{IE} + H_{\text{rel}\,IE}}{2} \tag{5}$$

$$\text{GEAS}_{IE} = 1 - \max\left|\frac{i}{k} - \frac{1}{\sigma}\sum_{j=1}^{i}\rho_j\right|, i = 1,\cdots,k \tag{6}$$

$$H_{\text{rel}_{IE}} = -\frac{\sum_{i=1}^{k} P_i \ln P_i}{\ln k} \tag{7}$$

式中,EVR 指标阈值在 0 和 1 之间, 各级服务强度极差越均等指标值越大。k 为分级数, ρ_j、σ 分别为第 j 级和

服务总极差。i 为各级的序号。P_i 为 i 级极差与总极差的比值。

(4)空间自相关一致性指标 SACC(Spatial autocorrelation consistency)

该指标描述分级后空间自相关格局与原始数据空间自相关性格局的接近程度。公式如下:

$$\mathrm{SACC} = 1 - \frac{|\mathrm{Morans}'I_q - \mathrm{Morans}'I_{\mathrm{raw}}|}{2} \tag{8}$$

$$\mathrm{Morans}'I = \frac{n}{S_0} \times \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{i,j} z_i z_j}{\sum_{i=1}^{n} z_i^2} \right) \tag{9}$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{i,j} \tag{10}$$

$$z_i = x_i - \bar{x} \tag{11}$$

式中,q 为分级方法代号,Morans′ I 理论范围为[-1,1],Morans′ I_{raw}为原始数据的空间自相关性,Morans′ I_q为分级后级别土壤保持强度平均值代替该级别栅格数值计算的空间自相关性。z_i 是栅格 i 的数值与总体均值的偏差,$w_{i,j}$ 为空间权重。Morans′ I 指数由 ArcGIS 10.5 Spatial Autocorrelation(Morans′ I)工具计算,权重为默认值,原理如公式(9)—(11)。

根据分级原则,综合分级质量评价需满足分级精度最大化、各级面积均衡、各级服务强度极差均衡及空间自相关特征不变等要求。为了排除各指标敏感性对综合评价值的影响,将各指标中心化、标准化后计算综合评价值。公式如下:

$$CI_i = I_i - \frac{\sum_{i=1}^{n} I_i}{n} \tag{12}$$

$$\mathrm{SCI}_i = \frac{CI_i}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} CI_i^2}} \tag{13}$$

$$\mathrm{IAV} = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{SCI}_i \tag{14}$$

式中,n 为指标个数,本研究 $n=4$。I,i 分别为指标评价值和代号,CI_i、SCI_i分别为中心化及中心化并标准化后的指标评价值,SCI_i 为负值表示所有分级方法中该分级方法的 i 指标评价值处于平均水平以下。分级方法的综合评价值用 *IAV*(Integrated assessment value)表示,表示为该种分级方法中心化并标准化后的各指标之和。

本研究使用 ArcGIS 10.5 相应分级模块实现 6 个县市土壤保持强度数据集 4 种分级方法(几何间隔法、自然断点法、等差法及分位数法)的分级;使用 EXCEL 表格和 ArcGIS 10.5 实现 6 个县市土壤保持强度数据集累积比例法分级;用 ArcGIS 10.5 导出各县市的服务强度及频数的属性表,用 EXCEL 打开,按服务强度的从大到小顺序排序,将各栅格服务强度累加,计算累加值占总值的比例,找出累积比例 25%,50%,75%,90%对应的分级界限,在 ArcGIS 10.5 的分级模块中手动输入相应的分级界限值,实现各县区土壤保持强度累积比例法分级;用 R 语言计算各县区不同分级方法的评价结果:首先,用 R 语言读取各县区的土壤保持强度及频数的属性表,输入各分级方法分级界限值,通过编程好的 R 语言代码计算各分级方法的评价结果;用 Excel 软件对分级评价结果进行可视化制图。

2　结果分析

2.1　分级方法各级服务强度和面积占比比较

分级结果显示(图 1),同一分级方法各级服务强度极差和各级面积占比在 6 个县区中有一定程度的相似特征。通过 6 个县区各级的服务强度极差占比的直观比较,等差法各级占比最均衡,各级约为 20%;自然断

点法次之,各级服务强度值极差占比范围为 4.2%—51.7%;累积比例法各级变异相对较大,各级服务强度值极差占比范围为 3.4%—78.8%;分位数法和几何间隔法变异最大,各级服务强度极差占比范围分别为 0.59%—90.6%和 0.39%—84.7%,第 1 级别服务强度的极差占比最小,分别仅占最大值的 0.59%—4.1%和0.39%—3.9%。

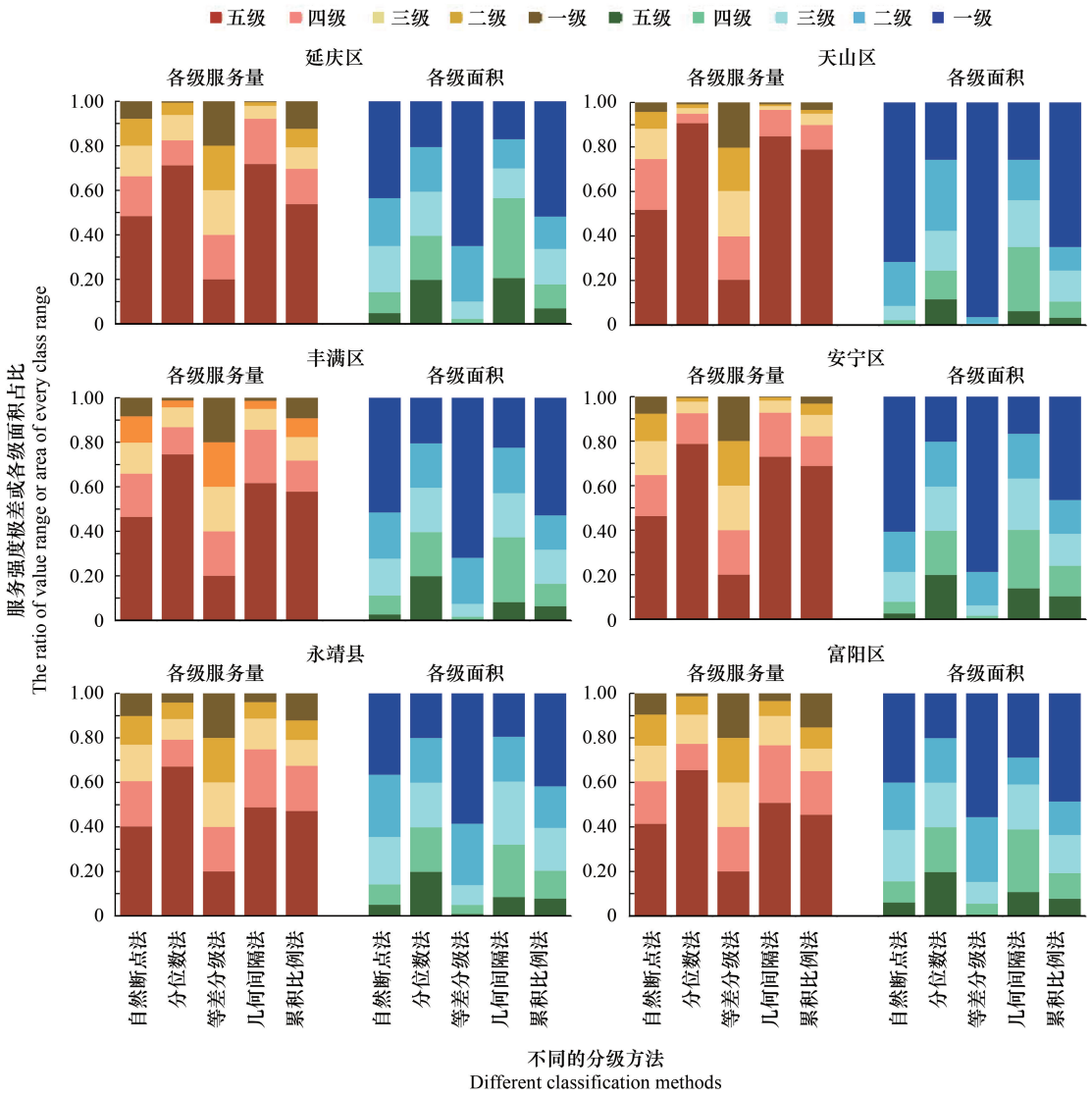

图 1 6 个县区各分级方法得到的各级土壤保持强度极差和面积占比

Fig. 1 Distribution of range ratio of soil retention service intensity and area ratio of every class using different classification methods in 6 counties

对于各级的面积占比的直观比较,大多数县区,分位数法各级面积最均衡。几何间隔法次之,各级面积占比范围为 6.2%—28.8%;累积比例法各级面积占比变化相对较小,范围为 3.1%—64.9%;自然断点法在多数县区各级面积占比变化较大,范围为 0.29%—71.7%,从低级到高级递减,第 5 级别面积占比范围为 0.29%—6.0%,都小于累积比例法第 5 级别面积占比,其中,天山区占比最小,仅为 0.29%,其他县区大于 2.5%;等差法各级面积分布变异最大,各级面积占比变化范围为 0.003%—96.4%,低级到高级面积占比减少,第 5 级占比很小,范围为 0.003%—0.8%,而第 1 级面积占比很大,范围为 55.6%—94.6%,其中,天山区和安宁市第 1 级分别占了 96%和 80%的面积。

2.2　不同分级方法的各指标评价结果比较

通过中心化和标准化处理后,5 种分级方法各指标评价值的均值为 0(图 2)。分级精度评价结果显示,6 个县区等差法的 AC 值最高,范围为 0.89—1.37,这说明等差分级法在 5 种分级方法种分级精度最好;累积比例法 AC 值大于均值,范围为 0.25—0.81,自然断点法 AC 值接近或大于均值,范围为-0.01—0.75,除安宁市,其他县市 AC 值均低于累积比例法,这说明累积比例法和自然断点法分级精度较优,对于多数县区累积比例法分级精度优于自然断点法;几何间隔法和分位数法 AC 值明显低于均值,范围分别为-1.14— -0.64 和-1.42— -0.81,这说明几何间隔法和分位数法相对于其他分级方法分级精度明显较差。

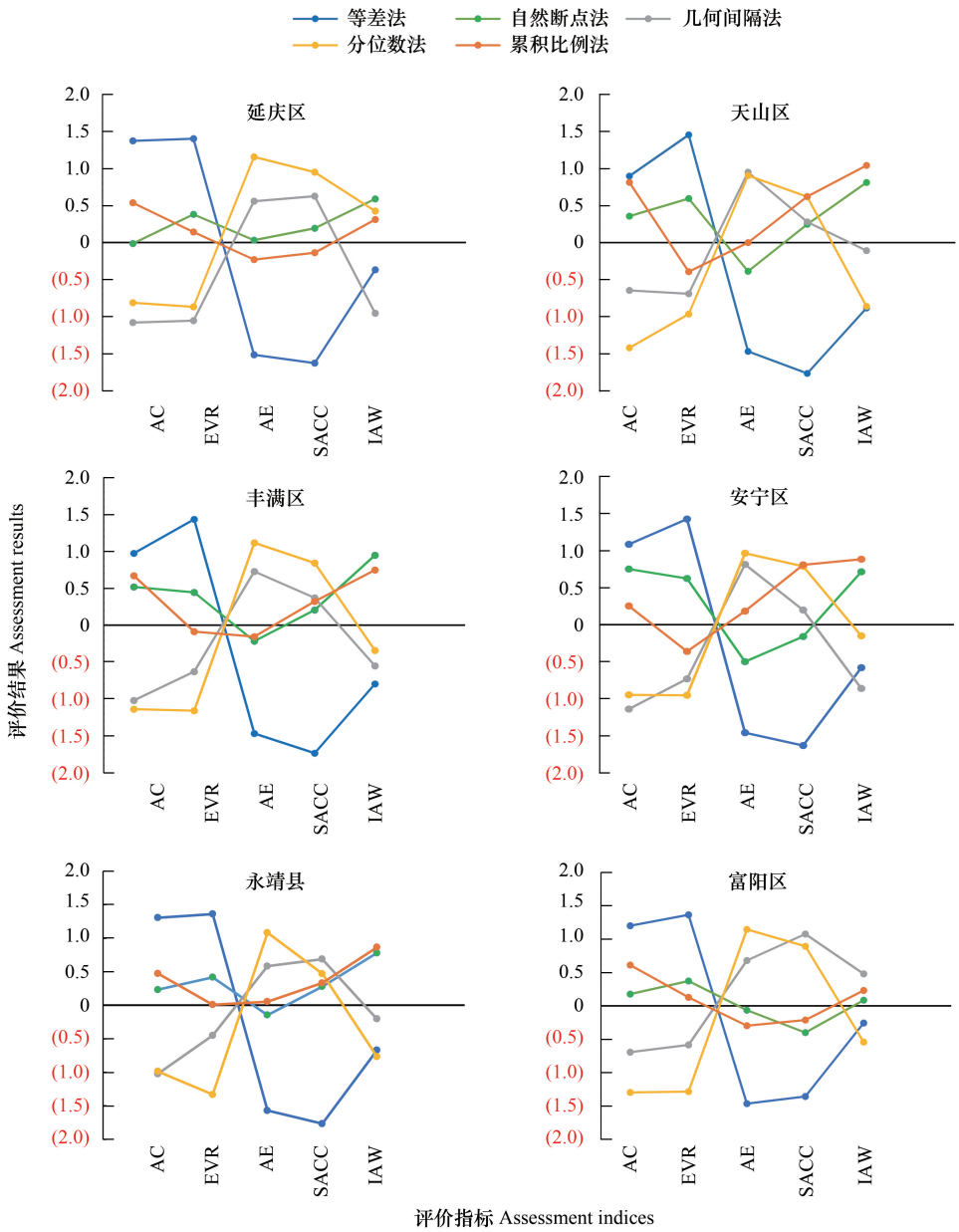

图 2　6 个县区分级方法评价结果

Fig. 2　Evaluation results of classification methods of soil retention services of 6 counties

AC, 分级精度 Accuracy of classification methods; EVR, 极差均衡性指标 Equality of value ranges of classes; *AE*, 各级面积均衡性 Areal equality; SACC, 空间自相关一致性 Spatial autocorrelation consistency; IAV, *AC*、*AE* 、EVR、SACC 的综合评价值 Integrated assessment value

极差均衡性评价结果显示(图 2),6 个县区等差法各级服务强度极差最均衡,EVR 值高于其他分级方法,

范围为 1.36—1.45;自然断点法次之,范围为 0.37—0.62,大于均值,说明自然断点法各级服务强度极差较均衡;累积比例法接近均值,为-0.39—0.14,说明累积比例法各级服务强度极差均衡性一般;几何间隔法和分位数法 EVR 值明显小于均值,分别为-1.06— -0.45 和-1.33— -0.87,除延庆区,分位数法 EVR 值都低于几何间隔法,说明几何间隔法和分位数法各级服务强度极差不均衡,对于大多数县市,分位数法不均衡程度更高。

面积均衡性评价结果显示,分位数法 *AE* 值范围为 0.90—1.12,几何间隔法 *AE* 为 0.55—0.95,除天山区几何间隔法 *AE* 值接近于分位数法,其他县市都低于分位数法,说明对于大多数县区分位数法分级面积最均衡,几何间隔法次之;累积比例法和自然断点法的 *AE* 值接近于均值,分别为-0.30—0.18 和-0.50—0.03,面积均衡性一般;等差法 *AE* 值-1.57—-1.46,明显低于均值,体现出等差法分级各级面积十分不均衡。

空间自相关一致性评价结果显示,分位数法和几何间隔法 SACC 值范围分别为 0.47—0.95,和 0.20—1.08,明显大于均值,除永靖县和富阳区外,其他县区分位数法 SACC 值大于几何间隔法,说明对于大多数县区分位数法分级与原数据的空间自相关格局最接近,几何间隔法次之;累积比例法 SACC 值范围-0.21—0.80,大于或接近于均值,说明累积比例法分级可反映原数据的空间自相关格局;自然断点法 SACC 均接近于均值,范围为-0.40—0.27,与原数据的空间自相关接近程度一般;等差法 SACC 值为-1.76— -1.36,明显低于均值,说明等差分级法分级对原数据空间自相关格局改变较大。

2.3 各分级方法综合评价结果比较

由图 2 进一步分析,对于各县区不同分级方法的综合评价值,水平轴代表 5 种分级方法综合评级值的均值。6 个县区中,延庆区自然断点法 IAV 值最高,为 0.60,分位数法次之,IAV 值为 0.42,累积比例法 IAV 值为 0.31,与分位数法接近,而等差分级法和几何间隔法 IAV 值小于均值,说明延庆区自然断点法综合制图效果最优,分位数法和累积比例法综合制图效果较优,而等差法和几何间隔法综合制图效果较差;天山区累积比例法 IAV 值最高,为 1.34,自然断点法次之,为 0.81,几何间隔法、分位数法、等差法低于均值,分别为-0.11,-0.86 和-0.88,说明天山区累积比例法综合制图效果最好,自然断点法综合制图效果较优, 几何间隔法综合制图效果较差,而分位数法和等差分级法综合制图效果最差;对于丰满区,自然断点法 IAV 值最高,为 0.95,累积比例法次之,为 0.75,分位数法、几何间隔法和等差分级法 IAV 值均小于均值,分别为-0.34,-0.55 和-0.80,对于丰满区自然断点法综合制图效果最优,累积比例法综合制图效果较优,分位数法、几何间隔法、等差法综合分级质量较差;对于安宁市,累积比例法 IAV 值最高,为 0.88,综合制图效果最优,自然断点法 IAV 值为 0.71,综合制图效果较优,其他分级方法 IAV 值都小于均值,综合制图效果较差;对于永靖县,累积比例法和自然断点法 IAV 值分别为 0.86 和 0.78,两者接近,说明累积比例法和自然断点法综合制图效果都较好,累积比例法略优于自然断点法,其他分级法 IAV 值小于均值,综合制图效果较差;富阳区几何间隔法 IAV 值最高,为0.48,累积比例法和自然断点法 IAV 值分别为 0.23 和 0.08,等差分级法和分位数法 IAV 值小于均值,说明富阳区几何间隔法综合制图效果最优,累积比例法和自然断点法综合制图效果较好,累积比例法略优于自然断点法,等差分级法和分位数分级法综合制图效果较差。

3 结论与讨论

3.1 讨论

从分级方法各级服务强度极差和面积占比分布来看(图 1),等差法能够直观的反映出 6 个县区土壤保持服务分布有相似的特征,即空间分布不均衡,低值区所占面积较大,低于最大服务强度 20% 的强度值占了大于 50% 的面积,高值区所占面积较小,高于最大服务强度 80% 的强度值覆盖面积小于 0.8% ,6 个县区中天山区分布最不均衡,安宁区次之。

由于各县区相似的土壤保持服务分布特征,每种分级方法的各指标和综合评价结果在 6 个县市显示出相似的特征。在 5 种分级方法中,累积比例法和自然断点法综合评价值都较高,且各指标评价结果较优,综合制

图效果较好;分位数法和几何间隔法分级后各级面积分布较均衡,分级后的空间自相关性与原始数据较一致,说明图面各级呈现聚集分布特征,清晰可辨,但两种分级方法分级精度较低,极差不均衡,这影响了大多数县区的综合制图效果;等差分级法虽然有较高的分级精度,各级服务强度极差分布均衡,但各级面积不均衡,低级区占据了较大的图面面积,高级区所占面积极小,几乎不能辨识,分级也不能反映原有数据的空间自相关分布格局,综合制图效果较差,不适合空间分布不均衡的土壤保持强度数据集的分级。

不同县市的土壤保持服务分布也有差异性,每种分级方法的各指标和综合评价结果也有一定程度的变化。几何间隔法和分位数法综合评价值在 6 个县区中的波动较大,延庆区分位数法综合分级效果接近于最优,富阳区几何间隔法综合分级效果最优,在这两个县市分位数法或几何间隔法分级后的面积均衡性和空间自相关一致性较其他分级方法有明显的优势,分级精度和各级服务强度极差一致性评价值虽然较低,但对综合制图效果未造成较大影响,其他县区两种分级方法综合评价值较差,尤其是服务强度分布不均衡的天山区,分位数法各级极差分别为 1,2,3,5,107 t $hm^{-2}a^{-1}$,几何间隔法各级极差分别为 1,1,2,14,100 t $hm^{-2}a^{-1}$,可见两种分级方法低级区极差间隔极小,几乎没有差别的服务强度值划分到不同的等级,而高级区服务强度变化范围较大,却用相同的级别表示,图面整体服务强度信息损失较大,同时分级图较大程度偏离了原有数据分布特征;自然断点法在土壤保持强度数据集不均衡程度较大的天山区和安宁市,分级后各级面积不均衡程度也较大,最高级区面积较小,制图呈现出较破碎化的特征;累积比例法在 6 个县区综合评价值始终为最优或接近于最优,结合图 1,累积比例法各级面积和各级服务强度极差占比没有过小的情况,最高级面积占比均大于自然断点法,说明分级图高级区聚集程度高于自然断点法,破碎化程度相对较小。可见,在 5 种分级方法中累积比例法适用性最广,能较好的适用于 6 个县市土壤保持强度数据集的分级。

本研究的多指标综合评价结果能够较可靠的反映出不同分级方法的相对优劣,有助于筛选出不同数据集对应的最优分级方法。对于综合评价值接近的分级方法,由于各指标分级质量的优劣不同,综合制图效果也有差异,可进一步综合分级结果(图 1)和各指标评价结果(图 2)筛选出理想的分级方法:若注重分级后各级的聚集程度和面积均衡,则考虑几何间隔法和分位数法,若注重更高的分级精度和各级服务强度极差均衡,则考虑自然断点法和累积比例法,同时追求最高级破碎程度小、易于辨识,则累积比例法优于自然断点法。

从各分级方法评价结果发现,在 6 个县区中累积比例法综合评价值最优或者接近最优,相较于其他分级方法适用性最广,在各县区都呈现理想的制图效果。这说明本研究设置的累积比例较适用于各县市土壤保持强度数据集分级。累积比例法分级,在反映出土壤保持强度分布特征的同时,各级累积量相对固定,可比性较强,较适合于多县区的比较制图。

进一步用累积比例法对各县区土壤保持强度进行分级制图(图 3),图面效果显示,6 个县区累积比例法所分各级都能清晰显示在图面上,各级代表的服务强度也有明显的差异,分级图信息量丰富,较符合实际的刻画出土壤保持服务的空间分布特征,综合制图效果较好。

由于受到 5 种备选分级方法的限制,评价结果筛选出的分级方法不是绝对最优, WebGIS[26-28] 等网络制图和参与式[29]制图的发展,在本研究的理论方法基础上开发交互式分级评价工具[30],嵌入到制图软件中[18,31],可方便制图者参考分级评价结果改动分级界限,进一步评价择优,不断探索更优的分级方案。同时,随着计算机计算能力不断提高,算法研究不断进步,将评价指标写入算法通过不断迭代,计算出最优分级界限逐渐成为可能[21],这将是今后进一步研究的方向。

3.2　结论

结合制图学理论,根据土壤保持服务数据统计分布特征和空间分布特征,除了考虑分级精度,各级面积均衡程度,还设置了极差均衡性、空间自相关一致性指标,对土壤保持服务数据常用的 5 种分级方法做评价分析,得出以下结论:

(1)对于分布在我国不同地方的 6 个县区,土壤保持服务分布差异较大,但呈现相似的分布特征,即空间分布不均衡,高值区面积较小,低值区面积较大,低于最大服务强度 20% 的强度值占了大于 50% 的区域面积。

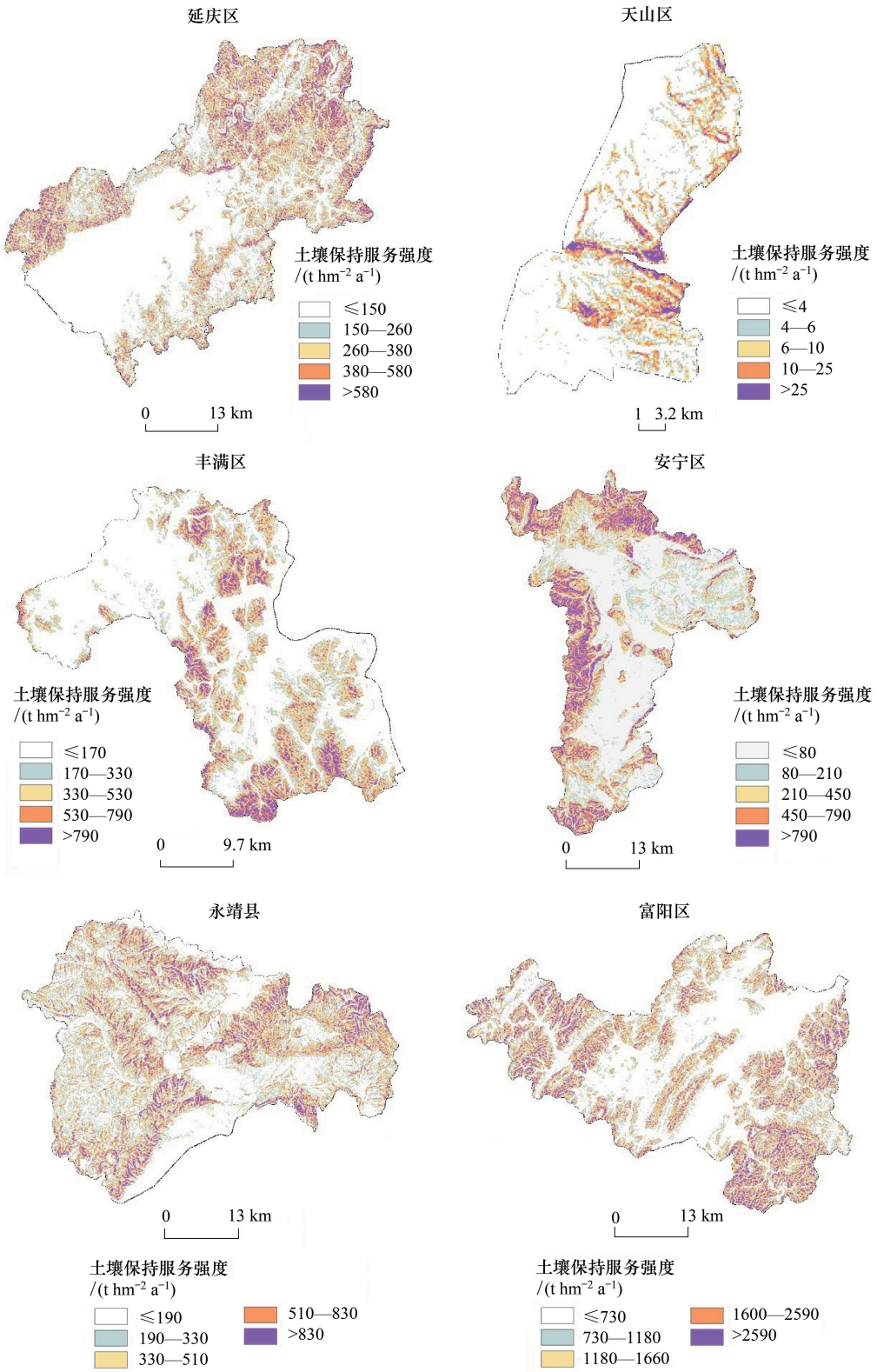

图 3 6 个县土壤保持强度分级制图

Fig. 3 Mapping intensity of soil retention services in 6 counties using excellent classification methods

(2)本文选择的 4 个制图效果评价指标,从不同侧面反映了生态系统服务的空间分布规律和制图工作要求,综合评价结果能反映出各县区不同分级方法综合分级质量的优劣程度。

(3)综合评价结果显示,不同县市的最优分级方法有差异,其中,延庆区、丰满区最优分级方法为自然断点法,永靖县、天山区、安宁市最优分级方法为累积比例法,富阳区最优分级方法为几何间隔法。累积比例法综合制图效果在6个县市最优或接近于最优,且各指标评价值较优,对不同数据集的适用性最好。

(4)本研究提供的分级方法质量评价的理论和方法,可为大比例尺生态系统服务栅格数据制图工作者提供科学选择分级方法的参考,提高制图的效率,也可作为自动化选择分级方法的参考。

致谢:饶恩明老师提供部分测量数据,特此致谢。

参考文献(References):

[1] Malinga R, Gordon L J, Jewitt G, Lindborg R. Mapping ecosystem services across scales and continents: A review. Ecosystem Services, 2015, 13: 57-63.
[2] Tobler W R. Choropleth maps without class intervals? Geographical Analysis, 1973, 5(3): 262-265.
[3] Gould J D, Schaffer A. Eye-movement parameters in pattern recognition. Journal of Experimental Psychology, 1967, 74(2): 225-229.
[4] Mackworth N H, Morandi A J. The gaze selects informative details within pictures. Perception and Psychophysics, 1967, 2(11): 547-552.
[5] Wang C Y, Pan D L. Zoning of Hangzhou Bay ecological red line using GIS-based multi-criteria decision analysis. Ocean & Coastal Management, 2017, 139: 42-50.
[6] 柏松, 景连东, 冯文兰, 牛晓俊. 四川省水土保持生态保护红线划定方法研究. 生态环境学报, 2018, 27(4): 699-705.
[7] 朱康文, 雷波, 何君, 杨春华, 李建辉, 郑莉. 县域尺度生态保护红线划定方法研究. 三峡生态环境监测, 2019, 4(1): 31-39.
[8] 苏泓宇. 祁连县生态服务功能、生态敏感性评价及生态红线划定的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
[9] 安静, 徐明德, 孙凯迪, 田钰朝, 孟补喜. 三级生态保护体系区划研究: 以山西省高平市为例. 环境科学与技术, 2018, 41(10): 226-232.
[10] 环境保护部办公厅, 发展改革委办公厅. 关于印发《生态保护红线划定指南》的通知. [2017-07-20]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm? keywords=环办生态〔2017〕48 号.
[11] Rao E M, Ouyang Z Y, Yu X X, Xiao Y. Spatial patterns and impacts of soil conservation service in China. Geomorphology, 2014, 207: 64-70.
[12] Schiewe J. Development and comparison of uncertainty measures in the framework of a data classification. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018, XLII-4: 551-558.
[13] Jenks G F, Caspall F C. Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction. Annals of the Association of American Geographers, 1971, 61(2): 217-244.
[14] Sun M, Wong D, Kronenfeld B. A heuristic multi-criteria classification approach incorporating data quality information for choropleth mapping. Cartography and Geographic Information Science, 2016, 44(3): 246-258.
[15] Smith R M. Comparing traditional methods for selecting class intervals on choropleth maps. The Professional Geographer, 1986, 38(1): 62-67.
[16] 陆效中. 统计地图的分级表示法. 北京: 解放军出版社, 1989.
[17] 孙亚梅, 王如云. 专题要素分级的新方法及其应用. 测绘学报, 1994, 23(1): 59-66.
[18] 孙娟娟, 刘缵武, 张玉灵, 江南. 基于多属性决策的统计数据分级综合评价模型. 测绘与空间地理信息, 2007, 30(5): 46-48.
[19] 何宗宜. 用信息论方法确定地图分级. 四川测绘, 1995, 18(1): 18-22.
[20] Monmonier M S. Measures of pattern complexity for choroplethic maps. The American Cartographer, 1974, 1(2): 159-169.
[21] Armstrong M P, Xiao N C, Bennett D A. Using genetic algorithms to create multicriteria class intervals for choropleth maps. Annals of the Association of American Geographers, 2003, 93(3): 595-623.
[22] 郭庆胜, 李留所, 贾玉明, 孙艳. 顾及空间自相关的统计数据分级质量评价. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(3): 240-243.
[23] Olson J M. Autocorrelation and visual map complexity. Annals of the Association of American Geographers, 1975, 65(2): 189-204.
[24] Armstrong M P, Xiao N C. Retrospective deconstruction of statistical maps: a choropleth case study. Annals of the American Association of Geographers, 2018, 108(1): 179-203.
[25] 党安荣. 人口密度分级的一般原则与定量标准的探讨. 地理科学, 1990, 10(3): 264-270.
[26] 刘吉夫, 陈顒, 陈棋福, 黄静. WebGIS 应用现状及发展趋势. 地震, 2003, 23(4): 10-20.
[27] 王天宝, 王尔琪, 卢浩, 黄跃峰. 基于 Silverlight 的 WebGIS 客户端技术与应用试验. 地球信息科学, 2010, 12(1): 69-75.
[28] 吴顺辉, 蒋成爱, 戴军, 胡月明, 梁中龙. WebGIS 在广东省土壤资源信息系统的应用. 华南农业大学学报: 自然科学版, 2002, 23(2): 15-17.
[29] Brown G, Fagerholm N. Empirical PPGIS/PGIS mapping of ecosystem services: a review and evaluation. Ecosystem Services, 2015, 13: 119-133.
[30] Yamahira T, Kasahara Y, Tsurutani T. How map designers can represent their ideas in thematic maps. The Visual Computer, 1985, 1(3): 174-184.
[31] 柳蛟. 基于 MapWinGIS 的人口空间统计管理系统的设计与实现——以重庆为例[D]. 重庆: 西南大学, 2010.