基于仙农熵的土壤多样性和土地利用多样性关联评价*

段金龙 [1,2] 张学雷 [1,2†]

（1 郑州大学自然资源与生态环境研究所，郑州 450001）

（2 郑州大学水利与环境学院，郑州 450001）

摘 要 以南京市为例，将多样性理论与方法应用于土壤和土地利用相关性评价中，对该市 1986 年和 2003 年的遥感数据进行了土地利用分类，计算了各土壤类型和各土地利用类型的构成组分多样性指数以及多网格尺度下的空间分布多样性指数，并提出一种用于评价土壤和土地利用相互关系的关联系数，求算了 5km 网格尺度下南京市典型土种单元同 9 种土地利用类型之间的关联系数。研究结果表明，1986 年至 2003 年这十余年间，南京市土地利用的构成组分变化明显，其中 1986 年的构成组分多样性为 0.361，2003 年为 0.444。2003 年南京市土地利用的空间分布离散性更高，5 种主要土地利用类型的空间分布多样性均有明显增加。南京市典型土种与各土地利用类型关联系数的计算结果表明，多组关联系数的变化趋势相同，由此推断相比于 1986 年，2003 年南京市土壤与土地利用之间的相互联系更为复杂多变。

关键词 土壤多样性；仙农熵；南京市；关联系数

中图分类号 S15 文献标识码 A

多样性概念与分析方法起源于信息论领域，最先用于计算生物的物种分布和遗传变异特征。近些年来，有关地多样性（Geodiversity）的研究日益受到关注，土壤多样性（Pedodiversity）作为表征地多样性的例子，成为 20 世纪 90 年代以后土壤科学研究的重要课题，特别是第 18 届世界土壤学大会将土壤多样性列为一个独立的专题后，更是日益受到国际间各方的重视。

土壤多样性理论及相关研究方法的建立始于西班牙，创立者为 Ibáñez 等[1-4]。近年来国外陆续有一些涉及该领域的研究报道[5-8]，研究方法也变得日趋成熟。Toomanian 等[9]对伊朗中部扎因代河谷的土壤多样性和成土作用进行了研究，评价了该地区的土壤异质性程度，发现用仙农熵评价土壤和土壤景观演化具有良好效果。Minasny 等[10]计算了世界土壤资源参比基础（WRB）的分类学距离和全球尺度下的土壤多样性指数，比较了基于土壤个体丰富度的传统多样性指数与基于分类学距离的多样性指数之间的异同。Guo 等[11]对美国国家土壤地理数据库（STATSGO）中的数据进行了土壤多样性计算，发现在低等级的土壤分类级别上（特别是土系级），土壤种类随研究区面积的增加而增多且结果与美国农业部实际记录的土系数目基本一致，指出美国由于土地利用变化使得很多特有土壤类型濒于消失应受到重点保护。Saldaña 等[12]对西班牙埃纳雷斯河流域土壤某些属性进行了深入研究，包括土壤丰富度和多样性指数的求算，丰富度与面积之间的连接性分析等，研究表明，从低阶地到高阶地土壤丰富度递增；土壤多样性指数随分类级别地增多而增大；土壤丰富度与面积之间的关联系数在中低阶地上符合对数函数曲线，在高阶地符合幂函数曲线，这与生态学中的物种丰富度与面积的连接性相似。本世纪初，土壤多样性理论与研究方法被引入我国[13-15]，张学雷等[16-18]基于海南岛土壤-地形体数字化数据库（SOTER）对海南岛的地形、母质、某些土壤性质等做了探索性的研究并取得积极进展。近年来，张学雷、王辉等[19-22]将嵌套子集概念引入土壤多样性研究中，应用该方法分析了长江三角洲地区城镇化占用土地的时空变化及其对土壤多样性的影响。张学雷等[23]将多样性概念在土壤系统分类与生物系统分类中的应用进行了对比，论证了多样性概念在描述中国土

---

*国家自然科学基金项目（40671012）和河南省重大公益项目（081100911600-1）资助

†通讯作者，E-mail：ZXLzzu@zzu.edu.cn

作者简介：段金龙（1984－），男，博士研究生，主要从事地理信息及资源遥感研究。Email: 215385212@qq.com

收稿日期：2010-12-10；收到修改稿日期：2011-03-28

壤系统分类体系架构涵义的适用性。在以上国内外有关研究中，仙农熵（Shannon entropy）均用来作为主要的多样性评价指数，对土壤分布的空间离散性等属性进行定量描述。

以上涉及该领域的研究多局限于单纯的土壤分布多样性或相关属性多样性的求算，而利用多样性研究方法对土壤资源与土地利用方式、水文水资源现状等其他研究领域之间的关联关系进行研究在国外尚处起步阶段。土壤与土地利用之间存在密切联系，土壤类型及属性的差异很大程度上决定了土地利用的方式，同时土地利用方式的不同也间接改变着土壤性质及土壤多样性格局[24-26]。最近，Yabuki 等[27]对日本北海道 10 个城市的土壤多样性和土地利用多样性进行了相关研究，并建议利用信息论中的互熵（Mutual entropy）概念来评价两者之间的关系。土壤是陆地生态系统的最基本因子之一，土壤的多样性分布与土地利用方式的多样性分布存在直接或间接的联系，本研究对南京市的土壤多样性和土地利用多样性进行了相关评价，并提出一种基于仙农熵概念的关联系数，以此定性定量地描述两者之间的交互关系。研究结果表明该关联系数评价方法具有可行性，在土壤多样性与其他资源分布多样性之间的关联性评价中具有实用意义。

1　材料与方法

1.1 研究区概况

南京市（118°47′E，32°03′N）是江苏省省会，位于长江下游沿岸，是长江下游地区重要的产业城市和经济中心。南京市属亚热带季风气候，雨量充沛，平面位置为东西窄、南北长，南面是低山、岗地、滨湖平原等。南京市共有 14 个土壤亚类、32 个土属、47 个土种。

1.2 数据来源及运行环境

选用美国地球资源卫星（Landsat）图像作为遥感数据源，选取 1986 年 12 月 7 日和 2003 年 1 月 12 日覆盖南京地区的两个时相的遥感栅格数据，其中 1986 年数据为 TM 数据，2003 年数据为 ETM+ 数据。由于两景图像获取季节相近，研究忽略数据间的时相差异。其他相关数据包括基于第二次土壤普查的南京市土壤图矢量数据、南京市统计年鉴（1987 年和 2004 年）等。研究中使用的 GIS 和遥感软件为 ArcGIS 9.2 和 ENVI 4.2。

1.3 研究方法

首先对遥感数据进行监督分类，将得到的分类图像进行矢量化处理，获取南京市土地利用矢量分类图。以土种为基本单元评价土壤多样性指数，通过计算斑块面积获取南京市土壤和土地利用的构成组分多样性指数，而后在不同网格尺度下获取土壤和土地利用的空间分布多样性指数。最后，通过关联系数的建立来评估土壤和土地利用空间分布及其多样性指数之间的内在联系。

将南京市土地分为 9 种利用方式：水域及水利设施用地、农用地、林地、草地、城镇建筑用地、公共服务用地、交通运输用地、工矿仓储用地和其他用地。

经典的土壤多样性计算公式，即仙农熵公式如下：

$$H = -\sum p_i \ln p_i \tag{1}$$

式中，H 是仙农指数，p_i 通过计算 n_i/N 所得，n_i 是被第 i 个土壤类别个体覆盖的面积，N 是研究区的总面积[14]。H 表示土壤种类的多样性分布程度，取值范围是[0，ln$S$]，当一个土类占据全部面积时取 0，当所有土类均匀分布时取极大值 ln$S$，S 表示土壤类别数，。

为更好地评价对象的空间离散性，使用如下仙农熵变形公式：

$$Y_h = \frac{-\sum_{i=1}^{S} p_i \ln p_i}{\ln S} \tag{2}$$

式中，S 和 p_i 的定义如下：

（a）在土壤和土地利用的构成组分多样性里，S 表示土种个数或者土地利用种类个数，p_i 表示第 i 个土种或者土地利用在所有土种或土地利用总面积里所占的比例。在此前提下，多样性指数 Y_h 表示在研究区内土壤或土地利用构成组分的多样性特征，即所有分类单元在数量构成上的均匀程度，这时 Y_h 形同 Pielou 均匀度指数[14]。

（b）在土壤和土地利用的空间分布多样性里，S 表示空间网格的数目，p_i 表示第 i 个空间网格里某个土种或某类土地利用的面积在该土种或土地利用总面积里所占的比例。在此前提下，多样性指数 Y_h 表示在研究区内土壤或土地利用空间分布的多样性特征，它表征了单个土壤或单个土地利用分布的离散性程度，即空间分布的多样性格局问题。

在两种情况下，多样性指数 Y_h 取值区间同为[0,1]，当相对丰度分布极度不均匀，也就是当一个或者少数几个对象占支配地位时，Y_h 取值趋于 0；当每个对象都均匀分布时，Y_h 取值等于 1。该仙农熵变形公式涉及到空间网格概念，因此在评价对象的空间分布多样性上比传统仙农熵公式更加精确。

2 结果与分析

2.1 土地利用分类结果

鉴于 TM 数据分辨率所限和南京市土地利用的实际情况，对照《土地利用现状分类》国家标准（2007 版），在满足计算要求的前提下对土地利用分类（图 1）做如下处理：农用地包括耕地、村落、乡村道路等，面积最大；果园归入林地；城镇居民用地仅包括南京市主城区及较大乡镇，商服用地归入城镇居民用地；公共服务用地仅包括城市及村镇的绿化用地和公园等；交通运输用地仅包括机场及主要道路桥梁；其他用地包括未利用荒地和大面积滩涂；删除特殊用地。

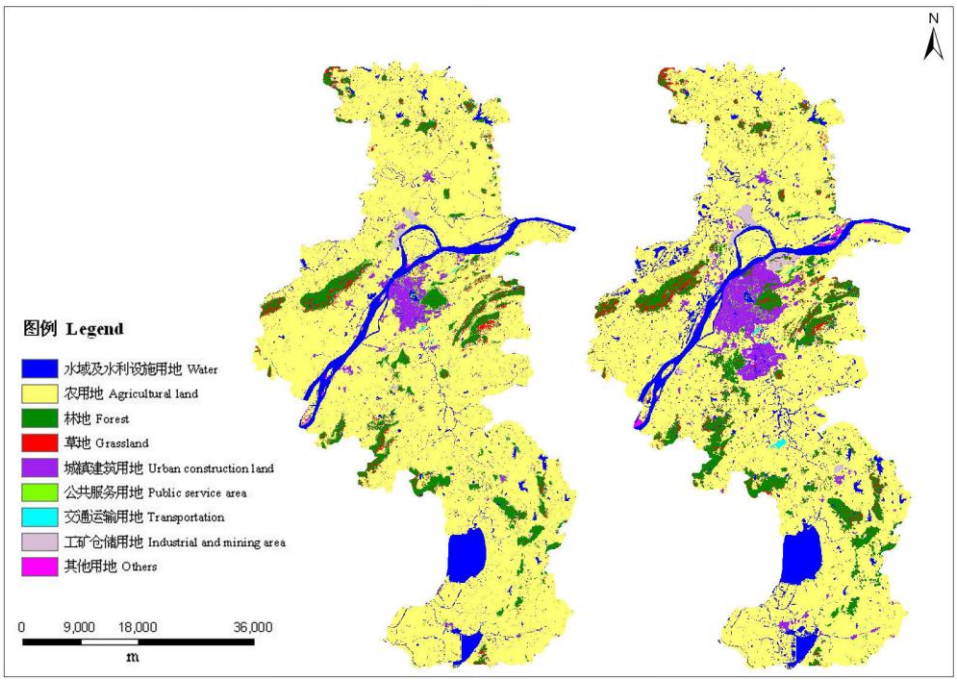


图 1 1986 和 2003 年南京市土地利用图（左为 1986 年，右为 2003 年）

Fig.1 Land use map of Nanjing City in 1986 and 2003 respectively (Left was 1986, right was 2003)

2.2 土壤和土地利用构成组分多样性

南京市共有 47 个土种，9 种土地利用类型，通过公式（2）计算出的多样性指数可以评价土壤和土地利用构成组分的丰富度。其中土壤的构成组分多样性指数为 0.775，由此可见南京市的各土壤类型分布相对均匀，混乱程度较高。1986 年土地利用的构成组分多样性指数为 0.361，2003 年该指数为 0.444(图 2)，结合分类结果和南京市城市化历程，可以推定土地利用构成组分多样性增加的原

因主要是农用地减少，1986 年的农用地在 2003 年部分转变为城镇建筑用地等其他土地利用类型，增加了南京市土地利用的混乱程度，即 2003 年土地利用分布较 1986 年更为均匀。

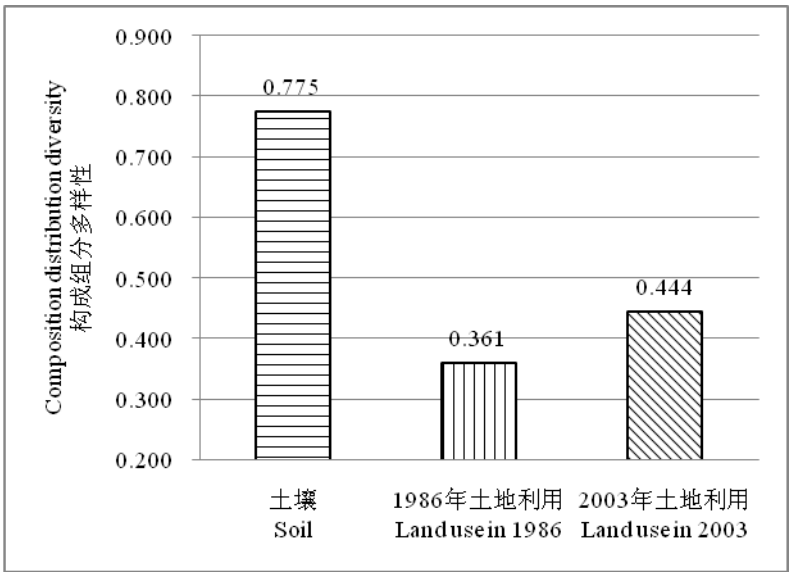


图 2 南京市土壤和土地利用构成组分多样性

Fig.2 Composition distribution diversity of the soil and land use of Nanjing City

2.3 异网格尺度下的空间分布多样性分析

在对空间分布多样性格局的研究中，首先需要注意网格尺度在一定程度上决定了空间分布的多样性格局，在 3 种网格尺度下（表 1），相异尺度的空间分布多样性指数大多是不同的。图 3 模拟了几种典型的土壤分布情况，其中（A）和（B）使用 1km 网格，（C）、（D）、（E）和（F）使用 2km 网格。通过计算可以得到：1km 网格尺度下，$Y_{hA}= Y_{hB}=0.5$；2km 网格尺度下，$Y_{hC}= Y_{hE}=0$，$Y_{hD}= Y_{hF}=1$。对比（A）（B）（C）（D）可以发现，当网格尺度是 1km 时，两种不同的土壤分布情况具有相同的多样性指数值；而当网格尺度是 2km 时，两种不同的土壤分布情况具有相异的多样性指数值。指数 Y_h 的这一特征说明不同的网格尺度下，土壤和土地利用的空间离散性是不同的。

另外，位置也决定了空间分布的多样性格局，图 3 中的（E）和（F）具有相同的空间分布和网格尺度，但两者位置不同从而具有相异的多样性数值。这个特性是利用空间分布多样性指数来评价对象的空间分散程度时所固有的缺点。为应对此缺点，一种解决方法是在一个网格尺度下通过移动所有网格，并计算多种移动方式下所得多样性指数的平均值；另一种方法是计算多种网格尺度下所得多样性指数的平均值，本文选用后一种方法（表 1）。

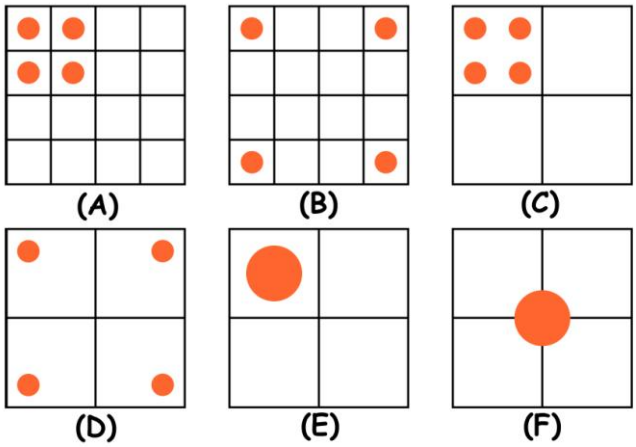


图 3 土壤空间分布模拟图

Fig. 3 Simulation map of soil spatial distribution

注：图中橙色圆形代表某土壤的斑块分布，(A)、(B)为 1km 网格，(C)、(D)、(E)、(F)为 2km 网格。Note: In this figure, the orange circles represent soil distributions, (A) and (B) are of 1km grid, and (C), (D), (E) and (F) 2km grid.

可以推断，某类土壤的空间分布越离散，该土壤上土地利用的空间分布也越离散，反之亦然。为评价每个土种和土地利用类型的空间分布离散性，利用公式（2）计算了空间分布多样性指数。当计算该指数 Y_h 时，需要首先设定一个网格尺度，Y_h 的数值与该尺度存在直接联系。

图 4 展示了一个人为构造的土壤空间分布例子，图中网格内的数字表示该网格内土壤 X 的面积，该例子中的空间分布多样性指数 Y_h=0.868，计算过程已列出。图 5 展示了南京市土壤空间分布的真实例子（左为栗色土，右为黄刚土），该例子获取于 5km 网格尺度下。图中空间离散性较低的栗色土多样性指数 Y_h 取值 0.610，空间离散性较高的黄刚土多样性指数 Y_h 取值 0.879。通过图 1 与图 5 的对比可以发现，栗色土斑块所在位置几乎都为林地，该区域内，土壤和土地利用的空间分布多样性都很低。

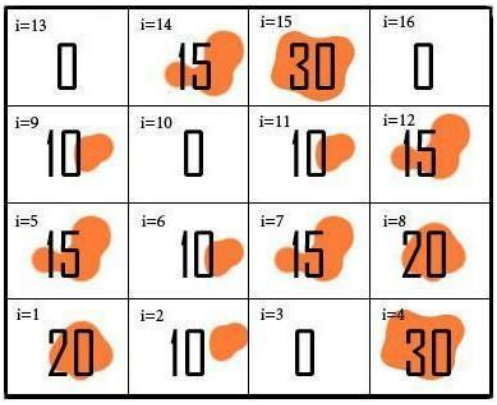


图 4 土壤 X 空间分布图

Fig. 4 An example of spatial distribution of soil X

注：该图分 16 个网格，网格内数字表示网格内土壤 X 的斑块面积，X 总面积为 200。Note: This figure has 16 grids, and the number in each grid indicate patch area of soil X. The total area of soil X is 200.

$$pi = \frac{\text{第}i\text{个网格内土壤X的面积}}{\text{X的总面积}};$$

P_1=20/200=0.10；

P_2=10/200=0.05；

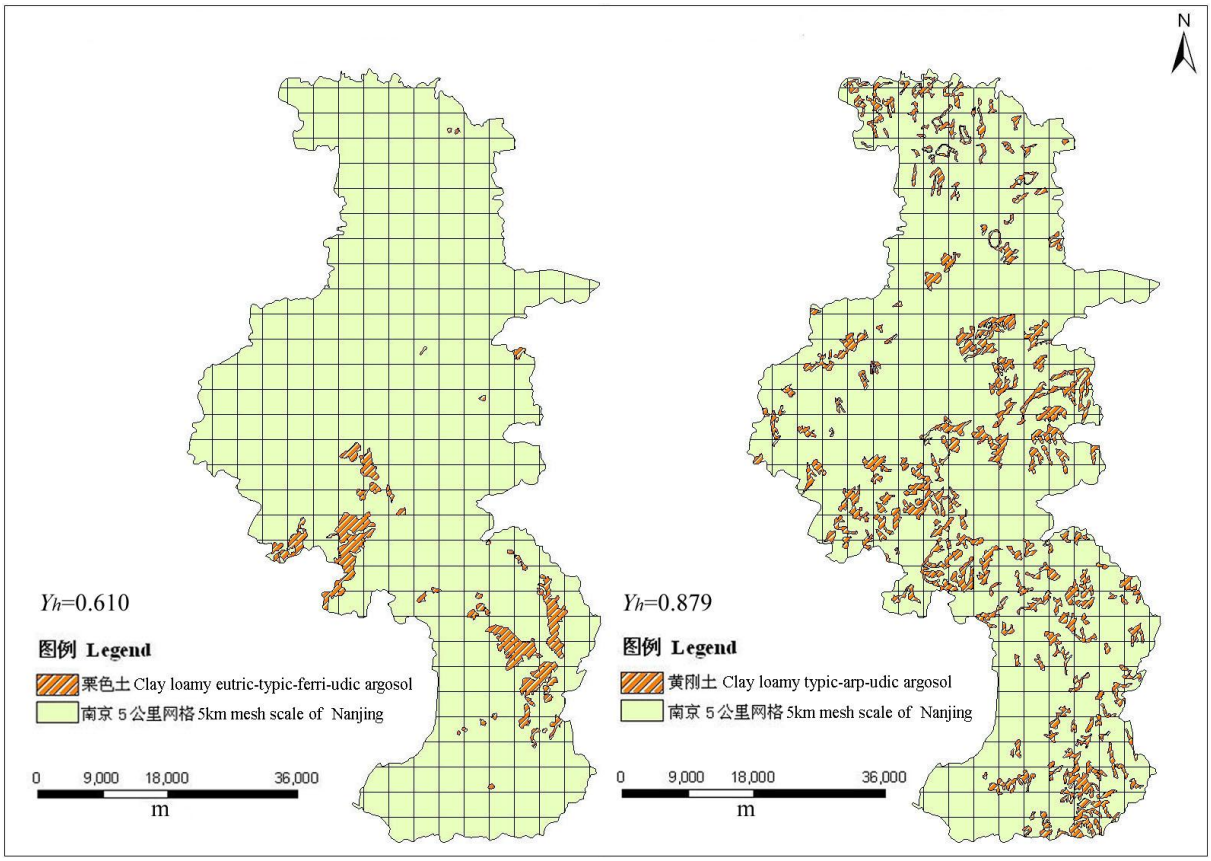
P_3=0/200=0；

……

S=16；

将数据代入公式（2）得：

Y_h=0.868



注 Note: 南京 5km 网格 Nanjing map in 5km grid

图 5 南京市土壤空间分布图（左为栗色土，右为黄刚土）

Fig. 5 Spatial distribution map of two soils in Nanjing (Left was Clay loamy eutric-typic-ferri-udic argosol, right was Clay loamy typic-arp-udic argosol)

表 1 显示同一土种在不同网格尺度下的多样性指数不同，分析统计了南京市 47 个土壤类型的空间分布多样性指数，共使用 5km、3.5km、2km 三种网格尺度。南京市面积最大的土种为马肝土，但黄刚土在三种网格尺度下的空间分布多样性指数都是最高的，这说明 47 个土种中黄刚土的空间分布最为均匀。表 2 统计了南京市 1986 年和 2003 年的土地利用分布情况和 5km 网格下各土地利用类型的空间分布多样性。

表 1 南京市土壤空间分布多样性统计表

Table 1 Soil spatial distribution diversity of Nanjing City

土壤类型代码 Pedotaxa code	土壤类型 Pedotaxa	总面积 Total area (km^2)	5km 网格 Y_h Y_h of 5km grid	3.5km 网格 Y_h Y_h of 3.5km grid	2km 网格 Y_h Y_h of 2km grid	3 种网格平均数 Averaged Y_h
1	暗色土	64.69	0.522	0.525	0.528	0.525
2	白马肝土	189.90	0.598	0.610	0.637	0.615
3	板浆白土	342.68	0.659	0.672	0.694	0.675
4	菜园黄土	50.20	0.443	0.429	0.475	0.449
5	菜园小粉土	24.30	0.305	0.296	0.357	0.319
6	菜园淤土	47.23	0.345	0.375	0.394	0.371

7	草渣土	56.45	0.394	0.383	0.440	0.406
8	岗黄土	293.11	0.745	0.730	0.727	0.734
9	河白土	132.26	0.513	0.532	0.564	0.536
10	河沙土	17.18	0.330	0.328	0.346	0.335
11	河淤土	377.55	0.689	0.694	0.704	0.696
12	红砂土	8.71	0.270	0.308	0.295	0.291
13	黄白土	854.87	0.816	0.819	0.824	0.820
14	黄刚土	814.47	0.879	0.868	0.854	0.867
15	黄红土	18.64	0.335	0.353	0.403	0.364
16	黄泥白土	37.01	0.283	0.297	0.370	0.317
17	黄砂土	227.22	0.643	0.659	0.660	0.654
18	灰沙土	14.24	0.278	0.221	0.297	0.265
19	灰黏土	21.58	0.337	0.360	0.364	0.354
20	鸡粪土	28.52	0.320	0.325	0.368	0.338
21	夹沙土	35.00	0.352	0.379	0.406	0.379
22	江沙土	5.80	0.042	0.131	0.195	0.123
23	江淤土	307.05	0.616	0.634	0.653	0.634
24	栗色土	256.39	0.610	0.639	0.651	0.633
25	卵石砂土	52.12	0.481	0.483	0.525	0.496
26	麻砂土	15.73	0.339	0.363	0.377	0.360
27	马肝土	918.52	0.848	0.848	0.840	0.845
28	泥骨土	85.14	0.338	0.401	0.465	0.401
29	青肝土	40.33	0.527	0.522	0.492	0.514
30	青泥白土	51.86	0.452	0.444	0.475	0.457
31	青泥条土	130.64	0.560	0.560	0.578	0.566
32	青泥土	51.05	0.370	0.419	0.457	0.415
33	沙底江淤土	29.12	0.385	0.409	0.424	0.406
34	沙土	23.60	0.397	0.391	0.423	0.404
35	山黑土	23.36	0.396	0.398	0.420	0.405
36	山红土	91.55	0.563	0.552	0.561	0.559
37	山沙土	19.35	0.411	0.394	0.431	0.412
38	石灰性马肝土	28.99	0.362	0.366	0.426	0.385
39	石灰性青肝土	2.44	0.178	0.222	0.200	0.200
40	蒜瓣土	19.59	0.383	0.366	0.392	0.380
41	滩土	8.98	0.278	0.336	0.306	0.307
42	乌底青泥土	3.51	0.092	0.039	0.157	0.096
43	乌泥河淤土	23.15	0.389	0.352	0.392	0.378
44	乌栅土	16.54	0.306	0.337	0.365	0.336
45	小粉土	40.43	0.431	0.469	0.475	0.458
46	淤土	130.05	0.566	0.563	0.585	0.571
47	紫红土	39.99	0.450	0.465	0.467	0.461

注 Note: 1 暗色土 Loamy eutric-dark-typic-ferri-udic cambosol, 2 白马肝土 Clay Loamy typic-Fe-leachic-stagnic anthrosol, 3 板浆白土 Loamy albic-Fe-leachic-stagnic anthrosol, 4 菜园黄土 Clay loamy fimic-ferri-udic argosol, 5 菜园小粉土 Fine

sandy loamy fimic-ferri-udic argosol, 6 菜园淤土 Loamy car-mottlic-fimic-orthic anthrosol, 7 草渣土 Clay typic-hapli-stagnic gleyosol, 8 岗黄土 Clay loamy eutric-arp-udic argosol, 9 河白土 Sandy typic-hapli-stagnic anthrosol, 10 河沙土 Sand loamy typic-hapli-stagnic anthrosol, 11 河淤土 Clay loamy typic-Fe-accumulic-stagnic anthrosol, 12 红砂土 Loamy eutric-red-ferri-udic argosol, 13 黄红土 Clay cho-typic-ferri-udic argosol, 14 黄刚土 Clay loamy typic-arp-udic argosol, 15 黄红土 Clay cho-typic-ferri-udic argosol, 16 黄泥白土 Clay Fe-leachic-gleyic-stagnic anthrosol, 17 黄砂土 Light gravel loamy typic-ferri-udic cambosol, 18 灰沙土 Sandy car-typic-Fe-leachic-stagnic anthrosol, 19 灰粘土 Clay eutric-dark-typic-ferri-udic cambosol, 20 鸡粪土 Clay loamy typic-dark-aqui-cambosol, 21 夹沙土 Sandy car-typic-Fe-leachic-stagnic anthrosol, 22 江沙土 Sand loamy car-typic-Fe-leachic-stagnic anthrosol, 23 江淤土 Clay loamy car-typic-hapli-stagnic anthrosol, 24 栗色土 Clay loamy eutric-typic-ferri-udic argosol, 25 卵石砂土 Gravel loamy typic-ferri-udic cambosol, 26 麻砂土 Loamy cho-typic-ferri-udic cambosol, 27 马肝土 Loamy typic-Fe-leachic-stagnic anthrosol, 28 泥骨土 Gravel clay typic-ferri-udic cambosol, 29 青肝土 Clay loamy vertic-gleyic-stagnic anthrosol, 30 青泥白土 Clay loamy Fe-leachic-gleyic-stagnic anthrosol, 31 青泥条土 Clay vertic-gleyic-stagnic anthrosol, 32 青泥土 Clay loamy vertic-gleyic-stagnic anthrosol, 33 沙底江淤土 Sandy car-typic-hapli-stagnic anthrosol, 34 沙土 Loamy car-aqui-alluvic primosol, 35 山黑土 Loamy mollic-car-udic-orthic primosol, 36 山红土 Clay loamy red-ferri-udic cambosol, 37 山沙土 Light gravel loamy typic-Fe-leachic-stagnic anthrosol, 38 石灰性马肝土 Calcaric loamy typic-Fe-leachic-stagnic anthrosol, 39 石灰性青肝土 Calcaric clay loamy vertic-gleyic-stagnic anthrosol, 40 蒜瓣土 Clay typic-hapli- aqui-cambosol, 41 滩土 Clay loamy car- hapli-stagnic gleyosol, 42 乌底青泥土 Loamy vertic-gleyic-stagnic anthrosol, 43 乌泥河淤土 Loamy typic-Fe-accumulic-stagnic anthrosol, 44 乌栅土 Clay car-vertic-gleyic-stagnic anthrosol, 45 小粉土 Fine sandy typic-Fe-leachic-stagnic anthrosol, 46 淤土 Clay loamy car-aqui-alluvic primosol, 47 紫红土 Light gravel clay loamy red-ferri-udic cambosol

表 2 南京市土地利用空间分布多样性统计表(5km 网格)

Table 2 Land use spatial distribution diversity of Nanjing City (5km grid)

土地利用类型 Land use types	1986 年总面积 Total area in 1986 (km^2)	2003 年总面积 Total area in 2003 (km^2)	1986 年空间分布多样性 Spatial distribution diversity in 1986	2003 年空间分布多样性 Spatial distribution diversity in 2003
水域及水利设施用地 Water	468.73	615.94	0.787	0.838
农用地 Agricultural land	5296.40	4829.08	0.970	0.965
林地 Forest	407.36	538.66	0.768	0.787
草地 Grassland	123.61	167.60	0.803	0.828
城镇建筑用地 Urban construction land	137.52	304.10	0.554	0.626
公共服务用地 Public service area	50.92	13.44	0.767	0.414
交通运输用地 Transportation	3.98	12.62	0.448	0.516
工矿仓储用地 Industrial and mining area	35.21	70.53	0.587	0.550
其他用地 Others	41.55	13.30	0.925	0.359

2.4 土壤和土地利用空间分布连接性分析

为表征土壤空间分布和土地利用空间分布之间的联系，选取南京市空间分布多样性最高的黄刚土、面积最大的马肝土和分布较少的栗色土这 3 个典型土种作为研究对象，统计了 3 个土种与 9 种

土地利用之间的公共面积（表 3），显示出 3 组公共面积具有相同规律：2003 年农用地公共面积较 1986 年均有不同程度减少，而其他几种公共面积 2003 年比 1986 年几乎都有大幅度增加。可以推断除去农用地影响，2003 年南京市土壤与土地利用之间的相互关系较 1986 年连接的更为紧密，该推断建立在典型土种与各土地利用类型的公共面积分析上。

表 3 土壤与土地利用公共面积统计表

Table 3 Public area statistics of soils and land uses (km^2)

时间及土种 Time and soil type	水域及水利设施用地 Water	农用地 Agricultural land	林地 Forest	草地 Grassland	城镇建筑用地 Urban construction land	公共服务用地 Public utility area	交通运输用地 Transportation	工矿仓储用地 Industrial and mining area	其他用地 Others
1986 年与黄刚土交集 Public area with ① in 1986	9.397	722.089	27.839	14.968	19.590	7.173	0.345	6.262	6.661
2003 年与黄刚土交集 Public area with ① in 2003	19.365	642.910	57.070	21.705	49.477	0.764	2.289	20.745	0.000
1986 年与马肝土交集 Public area with ② in 1986	18.374	868.367	8.485	4.428	6.712	3.921	0.633	1.391	5.895
2003 年与马肝土交集 Public area with ② in 2003	28.618	815.091	21.581	10.303	32.702	0.566	1.379	7.965	0.000
1986 年与栗色土交集 Public area with ③ in 1986	3.897	136.038	94.052	18.691	0.021	0.485	0.017	1.361	1.697
2003 年与栗色土交集 Public area with ③ in 2003	7.148	94.394	131.450	21.570	0.443	0.000	0.093	1.161	0.000

注 Note：①Clay loamy typic-arp-udic argosol; ②Loamy typic-Fe-leachic-stagnic anthrosol; ③Clay loamy eutric-typic-ferri-udic argosol

为确定土壤和土地利用空间分布多样性之间的相互关系，建立了一个关于土壤和土地利用的关联系数。公式如下：

$$r(A,B)=1-\frac{2Y_h(A,B)}{Y_h(A)+Y_h(B)} \tag{3}$$

式中，A 和 B 分别代表土壤类型和土地利用类型，$r(A,B)$表示土壤和土地利用之间的关联系数。$Y_h(A)$、$Y_h(B)$和 $Y_h(A,B)$的定义如下：

$$Y_h(A)=\frac{-\sum_{i=1}^{S} p_i \ln p_i}{n \ln S} \tag{4}$$

$$Y_h(B)=\frac{-\sum_{j=1}^{S} p_j \ln p_j}{m \ln S} \tag{5}$$

$$Y_h(A,B)=\frac{-\sum_{i=1}^{S}\sum_{j=1}^{S}p(i,j)\ln p(i,j)}{mn\ln S} \qquad (6)$$

式中，Y_h (A)代表 n 个土壤类型空间分布多样性指数的算术平均值，Y_h (B)代表 m 个土地利用类型空间分布多样性指数的算术平均值，$p(i,j)$称为联合概率，表示土壤 Ai 和土地利用 Bj 同时包含时的面积比，Y_h (A,B)表示所有土壤和土地利用公共斑块的空间分布多样性指数的算术平均值。

$r(A,B)$的取值范围为[0,1]，当土壤和土地利用的空间分布完全相同，即 $Y_h(A)=Y_h(B)=Y_h(A,B)$ 时，$r(A,B)=0$；当土壤和土地利用的空间分布没有任何关系，即 $Y_h(A,B)=0$ 时，$r(A,B)=1$。由此判定随 $r(A,B)$ 数值的增加，各土种与土地利用类型之间相互交错的关系更加复杂混乱。该关联系数反映了土壤与土地利用之间的空间分布相关性，它定量地描述了研究区内土壤种类与土地利用类型在空间分布上相互叠置的程度，它的取值由土壤斑块和土地利用斑块的分布及网格尺度所决定。

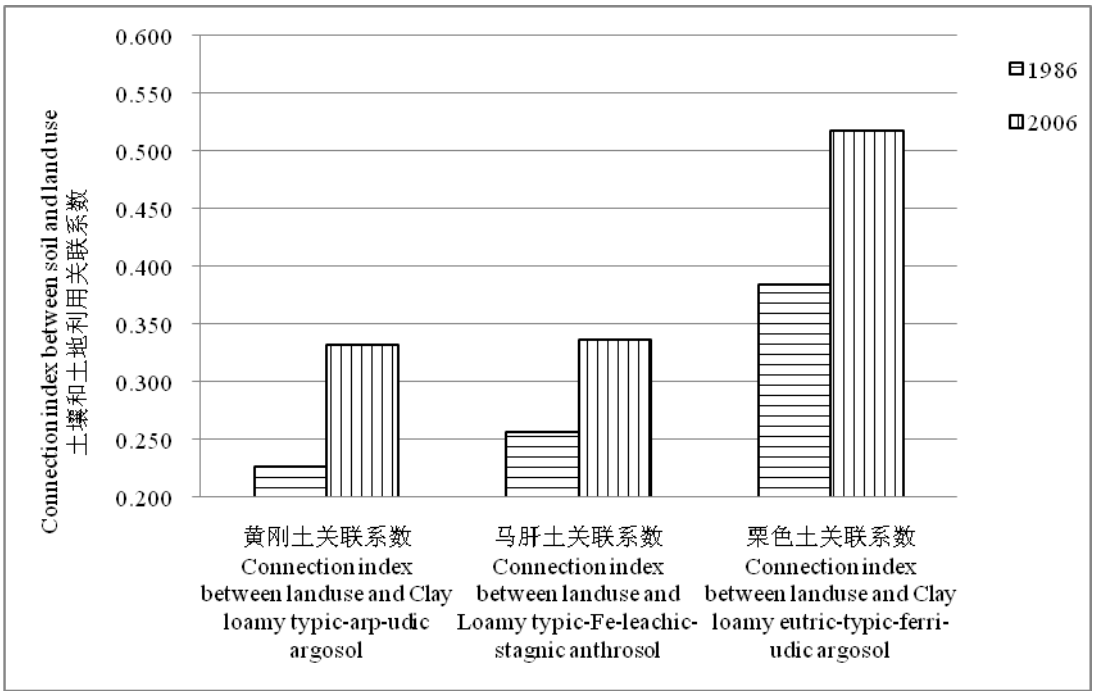


图 6 1986 和 2003 年南京市典型土壤与土地利用关联系数的变化

Fig.6 Change in connection index between typical types of soils and land uses in Nanjing City from 1986 to 2003

计算了 5km 网格尺度下南京市黄刚土、马肝土和栗色土这 3 个典型土种单元与 9 种土地利用类型之间的关联系数（图 6），其中黄刚土与土地利用之间的关联系数 1986 年取值 0.226，2003 年取值 0.332；马肝土与土地利用之间的关联系数 1986 年取值 0.256，2003 年取值 0.336；栗色土与土地利用之间的关联系数 1986 年取值 0.384，2003 年取值 0.518。结果表明，相同土壤类型下，2003 年土地利用的复杂程度均高于 1986 年，且变化趋势相似。可以推断相比于 1986 年，2003 年南京市土壤与土地利用之间的关系更为复杂，两者重叠区域的组成和分布情况更为多样化，该推断建立在土壤和土地利用空间分布多样性的连接性分析上。

3 结 论

为定量描述南京市土壤类型与土地利用类型之间的交互关系，研究计算了南京市土壤和土地利用的构成组分多样性指数和空间分布多样性指数，并提出一种用于评价土壤和土地利用空间分布相

关性的关联系数。研究表明：（1）南京市土壤的构成组分较为复杂；（2）在多种网格尺度下，南京市空间分布最离散的 3 类土壤均为黄刚土、马肝土和黄白土，但异网格尺度下的空间分布离散性不同；（3）2003 年南京市土地利用的构成组分较 1986 年复杂；（4）相比于 1986 年，2003 年南京市土地利用的空间分布离散性增加，且与土壤类型之间的连接关系更为复杂。

多样性概念及相关研究方法在对目标的构成组分和空间分布离散性评价中具有广阔的应用前景。但是单纯的求算土壤多样性指数并不利于该研究领域的发展，并缺乏一定的实用意义。随着与学科之间的交叉研究逐步加深，本文提出的关联系数 *r(A,B)*可以定量评价不同研究对象之间的空间分布相关性，利用该方法评价土壤和土地利用之间的相关性在国内尚属首次。在后续研究中，将尝试将其引入土地利用类型与城市热环境、土壤与植被覆盖度、土壤分布与水文水资源分布等不同研究领域的相关性评价中，探索不同自然资源要素的空间分布相关性，为资源的可持续利用提供科学依据。

参考文献

[1] Ibáñez J J, De-Alba S, Bermúdez F F, et al. Pedodiversity concepts and tools. Catena, 1995, 24: 214-232

[2] Ibáñez J J. The background of pedodiversity and pedogeomorphic diversity. Pedometron, 1995, 4: 2-4

[3] Ibáñez J J, De-Alba S, Lobo A, et al. Pedodiversity and global soil patterns at coarse scales (with Discussion). Geoderma, 1998, 83: 171-192

[4] Ibáñez J J, De-Alba S. On the concept of pedodiversity and its measurement. A reply. Geoderma, 1999, 93: 339-344

[5] Phillips J D, Marion D A. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas. Geoderma, 2005, 124: 73-89

[6] Phillips J D, Marion D A. Soil geomorphic classification, soil taxonomy, and effects on soil richness assessments. Geoderma, 2007, 141: 89-97

[7] Ibáñez J J, Caniego J, San-José F, et al. Pedodiversity-area relationships for islands. Ecological Modelling, 2005, 182: 257-269

[8] Saldaña A, Ibáñez J J. Pedodiversity, connectance and spatial variability of soil properties, what is the relationship? Ecological Modelling, 2007, 208: 342-352

[9] Toomanian N, Jalalian A, Khademi H, et al. Pedodiversity and pedogenesis in Zayandeh-rud Valley, Central Iran. Geomorphology, 2006, 81: 376-393

[10] Minasny B, McBratney A B, Hartemink A E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. Geoderma, 2010, 155: 132-139

[11] Guo Y Y, Gong P, Amundson R. Pedodiversity in the United States of America. Geoderma, 2003, 117: 99-115

[12] Saldaña A, Ibáñez J J. Pedodiversity analysis at large scales: an example of three fluvial terraces of the Henares River (central Spain). Geomorphology, 2004, 62: 123-138

[13] 张学雷，陈杰，檀满枝，等. 土壤多样性理论方法的新近发展与应用. 地球科学进展, 2003, 18(3): 374-379. Zhang X L, Chen J, Tan M Z, et al. Some most recent research progress on pedodiversity (In Chinese). Advance in Earth Sciences, 2003, 18(3): 374-379

[14] 张学雷，陈杰，龚子同. 土壤多样性理论在欧美的实践及在我国土壤景观研究中的应用前景. 生态学报, 2004, 24(5): 1063-1072. Zhang X L, Chen J, Gong Z T. What to do in China after a review of researches practices on pedodiversity in Europe and America (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5): 1063-1072

[15] Tan M Z, Zhang X L, Chen J, et al. Pedodiversity: a case study based on 1: 1 million scale SOTER of Shandong Province, China. Pedosphere, 2003, 13(3): 219-226

[16] 张学雷，陈杰，张甘霖. 海南岛不同地形上土壤性质的多样性分析. 地理学报, 2003, 58(6): 839-844. Zhang X L, Chen J, Zhang G L. Landform based pedodiversity of some soil properties in Hainan (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2003, 58(6): 839-844

[17] 张学雷，陈杰，张甘霖，等. 海南岛成土母质的地形多样性分析. 土壤学报，2004，41(2): 170-175. Zhang X L, Chen J, Zhang G L. Soil parent material based geomorphic diversity in Hainan Island, China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 170-175

[18] 张学雷，陈杰，张甘霖. 海南岛不同地形上某些土壤化学性质的多样性分析. 应用生态学报，2004，15(8): 1368-1372. Zhang X L, Chen J, Zhang G L. Landform-based pedodiversity of some soil chemical properties in Hainan Island, China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(8): 1368-1372

[19] 王辉，张学雷，陈杰. 嵌套子集：引入土壤多样性研究的讨论. 土壤通报, 2006, 37(4): 776-781. Wang H, Zhang X L, Chen J. Nested subset: Discussion on its possible use in pedodiversity analysis (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(4): 776-781

[20] 王辉，张学雷，张薇，等. 南京市土壤集合组成及其嵌套性分析. 生态学报, 2007, 27(1): 220-227. Wang H, Zhang X L, Zhang W, et al. Composition and nested analysis of pedological assemblages in Nanjing (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 220-227

[21] 王辉，张学雷，张薇，等. 基于嵌套子集方法对南京市城镇化用地时空变化分析. 土壤，2007，39(3): 421-427. Wang H, Zhang X L, Zhang W, et al. Nested subset method-based analysis of spatial and temporal change in landuse in Nanjing City under its growing urbanization (In Chinese). Soils, 2007, 39(3): 421-427

[22] Zhang X L, Wang H, Xiao G P. Nestedness analysis of land use change on pedodiversity under the intensive urbanization process//Robert J G, Prakongkep N. Soil Solutions for a Changing World. 19th World Congress of Soil Science Proceedings, Brisbane, Australia, 1-6 August 2010: 24-27

[23] 张学雷，王辉，张薇. 土壤系统分类与生物系统分类体系中的多样性特征对比分析. 土壤学报，2008，45(1): 1-8. Zhang X L, Wang H, Zhang W. Comparison of diversity characteristics between pedological and biological taxonomies (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(1): 1-8

[24] 孙燕瓷，张学雷，陈杰. 城市化对苏州地区土壤多样性的影响. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2060-2065. Sun Y C, Zhang X L, Chen J. Impact of urbanization on pedodiversity in Suzhou area (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(11): 2060-2065

[25] 檀满枝，陈杰，张学雷，等. 南京市近 20 年城镇用地扩展对土壤资源数量和质量的影响. 土壤学报，2005，42(6): 896-903. Tan M Z, Chen J, Zhang X L, et al. Impacts of urban expansion on quantity and quality of soils in Nanjing in the past twenty years (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(6): 896-903

[26] 王子芳，屈双荣，李阳兵，等. 重庆岩溶地区不同土壤类型的土地利用多样性分析. 水土保持学报，2006，20(2): 153-156, 196. Wang Z F, Qu S R, Li Y B, et al. Research on land use pattern diversity of different soil types in Chongqing karst area (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2): 153-156, 196

[27] Yabuki T, Matsumura Y, Nakatani Y. Evaluation of pedodiversity and land use diversity in terms of the Shannon entropy. 19 May 2009. http://cdsweb.cern.ch/record/1178038

CORRELATIVE EVALUATION OF PEDODIVERSITY AND LAND USE DIVERSITY BASED ON SHANNON ENTROPY

Duan Jinlong[1,2]　Zhang Xuelei[1,2†]

(*1 Institute of Natural Resources and Eco-environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*)

(*2 School of Hydraulic and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*)

Abstract　A case study of Nanjing City was conducted using diversity theories and methods to evaluate correlation between soil and land use. Based on the remote sensing data of the city in 1986 and 2003, its land uses were classified, and constituent diversity index and spatial distribution diversity index in different grid scales of each soil and each land use pattern was worked out and a connection index was proposed to evaluate the relationship between soil and land use pattern. Furtheron, the connection indice between 3 typical types of

soils and 9 land use patterns in the city were calculated at a 5km-grid scale. Results show that during the years from 1986 to 2003, significant changes took place in land use composition with constituent diversity increased from 0.361 in 1986 to 0.444 in 2003. The spatial distribution discreteness of land use patterns was significantly higher in 2003, and so was the spatial distribution diversity of 5 major types of land use. The calculation of the connection indice between typical types of soils and various land use patterns indicate that quite a number of pairs of connection indice varied in a similar trend, so it could be inferred that compared to the situation in 1986, the correlations between soils and land use patterns in Nanjing City were more complicated and varied in 2003.

Key words Pedodiversity; Shannon entropy; Nanjing City; Connection index