

基于 GIS 的东北农田畜禽粪便施用适宜性分析

李艳霞¹, 李帷², 韩伟¹, 杨明¹, 董云社², 林春野¹, 张丰松², 熊雄²

(1. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875 ; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 : 东北三省是我国重要的粮食生产和工业基地. 近年来, 随着经济发展增速加快和产业结构调整力度加大, 畜禽养殖业发展迅速, 畜禽粪便产生量也快速增加. 如何合理处置和利用畜禽粪便对东北三省的农业生产和环境保护都具有重要意义. 本研究基于 GIS 平台, 从自然、环境、社会和经济等多方面对东北三省畜禽粪便农田施用的适宜性进行了定量分析和评价. 结果表明, 东北三省 78.9% 的耕地适宜施用畜禽粪便, 总面积为 211 942.7 km², 主要分布在黑龙江和吉林省的大部分地区. 总体来看, 与居民区、水体和道路之间的禁施距离, 是限制东北三省畜禽粪便耕地施用的关键因子, 降雨量差异是影响耕地施用畜禽粪便适宜性地区差异的主要因子. 结合适宜施用畜禽粪便的耕地面积和现有畜禽养殖水平, 以畜禽粪便排放 P₂O₅ 为评价指标, 36 个城市的养殖可发展潜力从四平市超出耕地负荷 181.3 万头到齐齐哈尔市 1 120.3 万头的盈余, 差异较大. 从区域分布看, 东部区域还有 284.2 万头的养殖发展空间, 西部地区的辽宁中部和吉林中部近一半城市畜禽养殖量已经超过耕地可承载能力, 而典型山区林区的养殖业进一步发展的空间相对较小(25.2 万头的盈余量), 应该适度控制和调整养殖业的发展.

关键词 : 畜禽粪便 ; 土地利用 ; 适宜性 ; 地理信息系统 ; 最大可承载量 ; 东北三省

中图分类号 : X508 ; X52 文献标识码 : A 文章编号 : 0250-3301(2010)04-1092-09

GIS-based Analysis of the Land Suitability for Manure Application in the Northeastern Provinces

LI Yan-xia¹, LI Wei², HAN Wei¹, YANG Ming¹, DONG Yun-she², LIN Chun-ye¹, ZHANG Feng-song², XIONG Xiong²

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China ; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract : As an important industrial and grain production base of China, livestock and poultry industry have been rapidly developed in the northeastern provinces. With the rapid increasing amount of animal production, how to handle the huge amount of animal manure has become a critical issue for local government. A quantitative analysis based on geographic information system (GIS) combining the biophysical, environmental, social and economic factors was applied to determine the land suitability for manure application in the northeastern provinces. The results show that a farmland area of 211 942.7 km², accounting for 78.9% of the cultivated land in three northeastern provinces, is estimated to be suitable for manure application. The suitable farmlands are mostly distributed in Heilongjiang and Jilin provinces. Proximity to residential area, water body and roads are identified as the primary factors influencing the manure application, while rainfall is the main factor to generate discrepancies in different areas. Furthermore, the future potential capacity for animal production in three provinces was forecasted based on the areas of suitable land and the population of existing livestock production. Among 36 cities of three provinces, the big variation is observed, Siping City is overproducing 1.813 million heads of pig unit at present, but Qiqihaer City still has the potential to rear 11.203 million heads of pig unit. Overall, eastern region of the study area holds the high potential for animal production with a surplus capacity of 2.842 million heads of pig unit, the potential of the typical mountain and forest areas is only 10% of eastern region, however. In contrast, in half of western region (central Liaoning province and central Jilin Province), their animal populations have exceeded the land carrying capacity. Therefore, we strongly suggest a site-specific animal production and manure application guide to achieve a sustainable development of livestock production in the northeastern provinces.

Key words : animal manure ; land application ; land suitability ; geographic information system (GIS) ; maximum carrying capacity ; the three northeastern provinces

畜禽粪便作为有机肥施入农田不仅为作物提供养分、改良土壤, 同时也是一种简便的废弃物处理途径^[1]. 然而, 随着我国畜牧业快速发展, 畜禽粪便排放量急剧增长. 畜禽粪便不合理的处置和利用导致了水体、土壤污染等一系列环境问题^[2-4], 如地下水

收稿日期 2009-05-22 ; 修订日期 2009-07-13

基金项目 环保公益性行业科研专项项目(200909042) ; “ 十一五 ” 国家科技支撑计划项目(2006BAD10B05) ; 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07209-007)

作者简介 李艳霞(1970 ~), 女, 副教授, 主要研究方向为废弃物处理及其污染风险, E-mail : liyxnbnu@bnu.edu.cn

硝酸盐污染、地表水富营养化、土壤重金属的累积等,已成为农村面源污染的主要原因之一^[5]。因此,合理的利用畜禽粪便对于农业生产和环境保护都具有重要意义。近年来,随着畜禽养殖业环境问题的日益凸现,国内针对畜禽养殖业环境影响、污染风险和防治对策开展了大量研究。近期关于畜禽粪便环境影响和风险评价的研究主要围绕土壤养分的输入输出平衡,基于畜禽粪便养分含量、作物养分需求等因素^[6-9]。但是,合理利用畜禽粪便除了通常最直接考虑的养分因素,如农田养分水平、不同作物的养分需求、不同种类畜禽粪便的养分含量等,还应该考虑粪便施用的区域条件,如土地利用类型、土壤质地、地形、对水体以及居民区的污染风险、施用粪便的运输距离等多方面的因素^[10]。

近 20 年来,东北三省经济发展遇到了矿业资源枯竭、地方经济增长乏力和产业竞争力下降等一系列问题^[11-13]。国家提出了以产业转型为核心的振兴东北经济的发展战略,其中畜禽养殖业是农业和农村经济调整的关键产业。辽宁、吉林和黑龙江省分别提出了“畜牧倍增”、“以粮换肉”和“主副换位”的加快畜牧业发展的计划。本文以东北三省为研究区域,综合考虑区域的自然、环境、社会和经济等多因素,利用 GIS 手段对东北三省适宜施用畜禽粪便的土地分布及特征、影响因素和畜禽养殖未来的发展潜力进行分析,以期对东北三省畜禽粪便的合理利用和畜禽养殖业的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

东北三省包括辽宁、吉林和黑龙江三省,位于东经 $118^{\circ}53' \sim 135^{\circ}05'$,北纬 $38^{\circ}43' \sim 53^{\circ}33'$ 。总土地面积 78.78 万 km^2 ,耕地面积 20.04 万 km^2 ,占全国的 16.6%。自然条件复杂多样,地形大致成 3 个向东凸出的半环带,即最外一环为黑龙江、乌苏里江等河流谷地,其内紧连着大、小兴安岭和东部山地丘陵,最内是东北大平原。东北地区是中国的“工业摇篮”,全国重要的重工业基地和商品粮基地。北部的三江平原是我国重要的商品粮生产基地;中部的松嫩平原分布着我国肥沃的黑土区,是重要的粮食主产区、能源和重化工基地;西部分布着半干旱草原,是农牧业交错区和牧区。研究区域内分布着松花江水系(黑龙江、吉林境内)和辽河水系(辽宁境内),是东北三省重要的工农业和生活水源,总流域面积 63.05 万 km^2 ,占全区域总面积的 80%。土壤以黑

土、黑钙土、暗草甸土和白浆土为主,是世界上三大黑土带之一。研究区域行政区划及地势、水系分布见图 1。

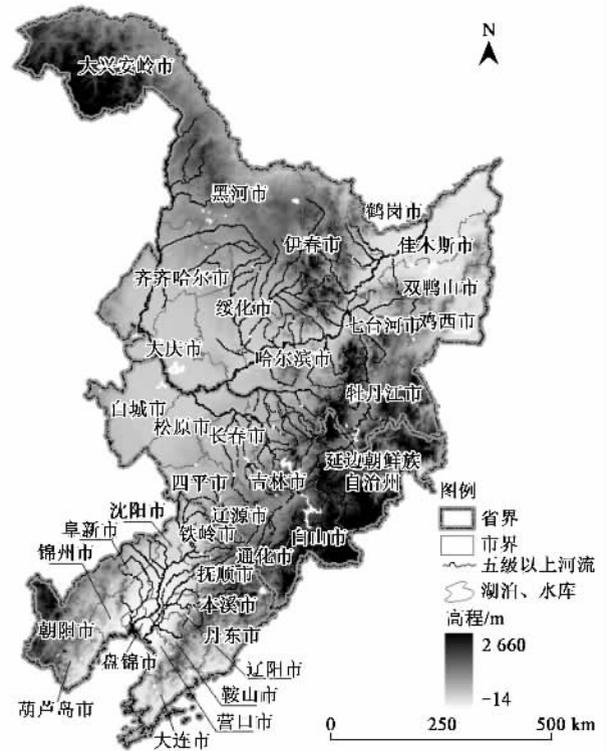


图 1 东北三省行政区划及地势、水系分布示意

Fig. 1 Administrative regions, topography, and watercourses in the three northeastern provinces

1.2 研究方法

1.2.1 数据收集和预处理

东北三省 1/10 万土地利用、1/25 万耕地坡度、水系、行政区划和 1/100 万土壤类型数据库来源于中国科学院环境科学数据中心。主要畜禽(猪、牛、羊、禽)的养殖数量来自各省、市统计年鉴、农业年鉴、畜牧业年鉴及调查资料。本研究是基于定量化为主要的畜禽粪便土地利用适宜性分析,为了便于不同空间数据层的叠加和运算,所有数据都统一为 50 m \times 50 m 精度的栅格形式。

1.2.2 分析因子的选取及其标准化量化

畜禽粪便土地利用的适宜性受多种因素的影响,国外在这方面开展了许多相关工作^[14-16]。本研究以我国以及其它国家地区出台的相关法规为依据,综合考虑自然、环境、社会和经济因素,重点选择 6 个因子作为畜禽粪便土地利用适宜性评价因子^[17,18],具体因子及评价标准描述见表 1。

对于不适宜粪便土地利用的因子属性(如坡度

表 1 畜禽粪便土地利用适宜性分析因子

Table 1 Exclusionary criteria applied to input factors to avoid risks involved in animal waste application in sensitive agricultural fields

评价因子	评价标准	文献
土壤质地 F1	对沙质容易产生径流和渗透性较强的土壤不适宜施用粪肥	[19]
坡度 F2	<25°,越小说越好	[20]
与水体距离 F3	与地表水体距离不得小于 100 m,越远越好	[21]
与城镇居民区距离 F4	最小距离不得小于 250 m,越远越好	[21]
与道路距离 F5	25 m 范围内不得施用,越近越好	[21]
降雨量 F6	高降雨区不适宜施用粪肥	[19]

>25°,与水体距离 <100 m,砂质土壤等)需要从输入因子中扣除,其余因子的属性用 0~1 之间的线性连续数值来度量.为了反映分析因子之间的关系及其差异,并使各因子的量值与畜禽粪便土地利用适宜性成正相关,采用如下的归一化法对各个因子的初始值进行标准化处理.当分析因子(与水体距离、

与居民区距离)的值越大,表示畜禽粪便土地利用适宜程度越高,采用式(1)进行标准化量化.

$$X_i = \frac{R_i - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \quad (1)$$

当分析因子(坡度、与道路距离、与集约化养殖场距离)的值越小,表示畜禽粪便土地利用适宜程度越高,则采用式(2)计算:

$$X_i = 1 - \left(\frac{R_i - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \right) \quad (2)$$

式中, X_i 是第*i*个栅格单元的标准量化值; R_i 为第*i*个栅格单元的值; R_{\max} 是所有栅格数值的最大值; R_{\min} 是所有栅格数值的最小值.

1.2.3 分析因子的权重

分析因子的权重是用于确定影响畜禽粪便土地利用适宜性的因素贡献大小.本研究参考 Basnet 等^[17]的研究,采用目标定位比较方法(objective oriented comparison, OOC),各个因子的权重和评价等级见表 2.

表 2 分析因子的权重

Table 2 Determination of the weights of input factors using an objective oriented comparison

分析因子	目标 ¹⁾								总和	权重
	A	B	C	D	E	F	G	H		
土壤质地	1/2	1/2	1	1	1	1	0	0	5	0.35
坡度	1	1/2	0	1	1/2	0	0	0	3	0.22
与水体距离	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.07
与居民区距离	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0.07
与道路距离	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0.07
年均降雨量	1	1/2	0	1	1/2	0	0	0	3	0.22
总和									14	1

1)分析因子基于以下方面的贡献:A为减少对地表水污染;B为减少对地下水的污染;C为减少对土壤的污染;D为减少养分地表径流损失;E为减少养分下渗损失;F为提高养分利用率;G为减少粪肥施用的费用;H为减少大气污染(臭气);分值 0 为无贡献;1/2 为部分贡献;1 为全部贡献

1.2.4 畜禽粪便土地利用适宜性计算

根据已确定的各项因子的量化值 X_i 和权重,利用权重线性加和法(weighted linear combination, WLC)来确定畜禽粪便土地利用的适宜性.

$$S_i = 100 \times \sum_{j=1}^n X_{ij} W_j \quad (3)$$

式中, S_i 为第*i*个栅格单元畜禽粪便土地利用的适宜值; X_{ij} 为第*j*个分析因子第*i*个栅格单元对应的量化值; W_j 为第*j*个因子的权重; n 为评价因子的个数.计算得到的适宜值在 0~100 范围内.

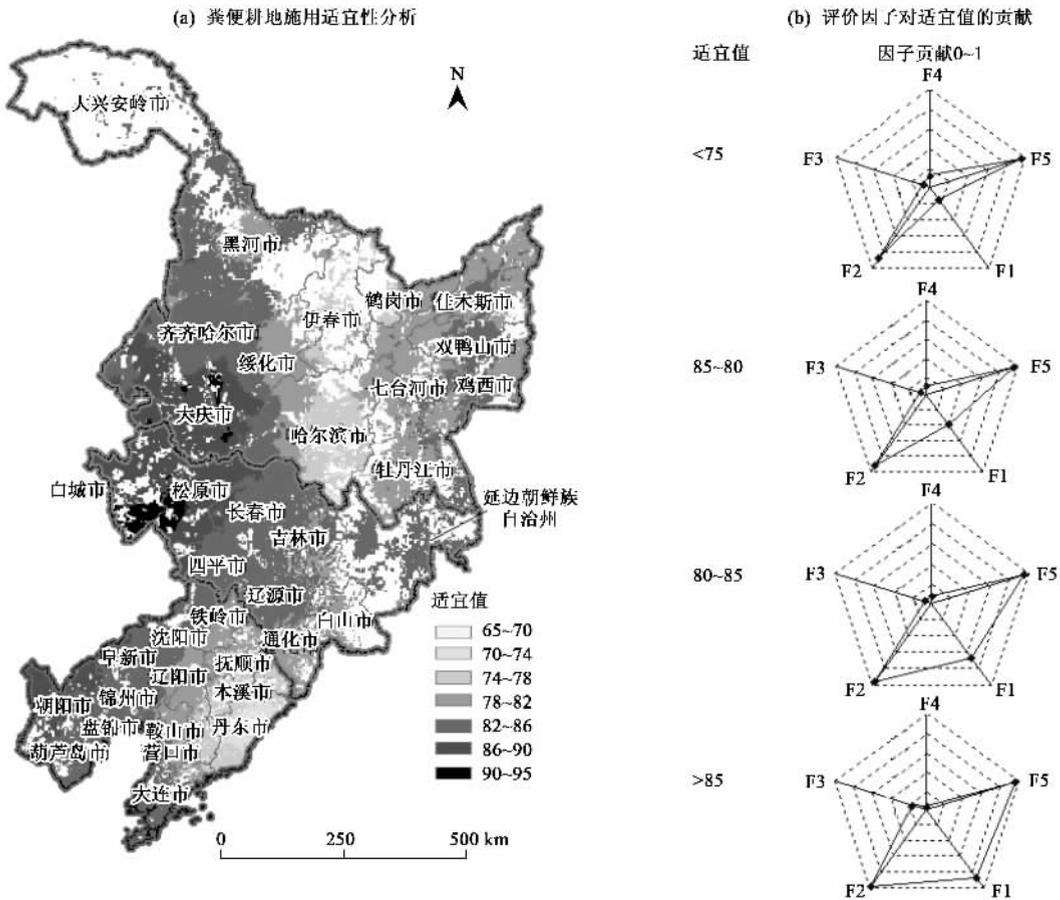
2 结果与讨论

2.1 东北三省畜禽粪便土地利用的适宜性

通过各因子的空间处理和计算,得到东北三省

畜禽粪便土地利用适宜性分布,见图 2.

总体看,东北三省适宜施用畜禽粪便的耕地面积较大,其平均 78.9%的耕地,即 211 942.7 km²适宜施用畜禽粪便.东北三省适宜施用畜禽粪便耕地的分布不均衡[图 2(a)],黑龙江和吉林两省大部分地区分布了 78%的适宜耕地,其中的 45.3%的适宜耕地主要分布在齐齐哈尔、哈尔滨、绥化、黑河、佳木斯和长春,大约 21%的适宜耕地分布在辽宁省,而辽源、白山和大兴安岭地区适宜施用粪便的耕地只有零星分布,仅占研究区耕地总量的 1%.从适宜施用畜禽粪便的耕地占三省各自农田的比例看,辽宁和吉林省适宜施用畜禽粪便的耕地比例均为 73%,而黑龙江省达到 83%.比较耕地施用粪便的适宜性,与山区分布广、砂质土壤比例较高的北京相



F2 ~ F6 是各因子的标准量化值,其中 F2 为耕地坡度, F3 为耕地与水体距离, F4 为耕地与居民区距离, F5 为耕地与道路距离, F6 为年均降雨量. F1 为土壤质地,在图 2 (b)评价因子中未比较 F1 对适宜值的贡献,因为评价标准中砂质土不适宜施用畜禽粪便,已从适宜耕地中去除,非砂质土壤量化值均为 1

图 2 东北三省畜禽粪便土地利用适宜性分布示意

Fig. 2 Distribution of suitable lands for animal manure application in the three northeastern provinces

比^[18],整个东北三省区域内耕地施用畜禽粪便的适宜性均较高(适宜值为 65 ~ 95).这主要是由于东北三省的耕地坡度和土壤质地条件较好,研究区内 > 25°的耕地分布极少(仅占耕地总量的 0.01%),这样使得坡度因子的量化值较大[图 2 (b)],而耕地土壤以非砂质为主,砂质土壤仅占总耕地的 1.53%,因此,得到较高的耕地适宜值.从适宜性整体分布看,辽宁东南部和黑龙江中部耕地施用畜禽粪便的适宜性最低[图 2 (a)],以这 2 个地区为中心向周围带状扩散,耕地的适宜性逐渐增高,适宜性最好的施用区集中在吉林西北部,黑龙江的西南部以及辽宁的西部边缘.

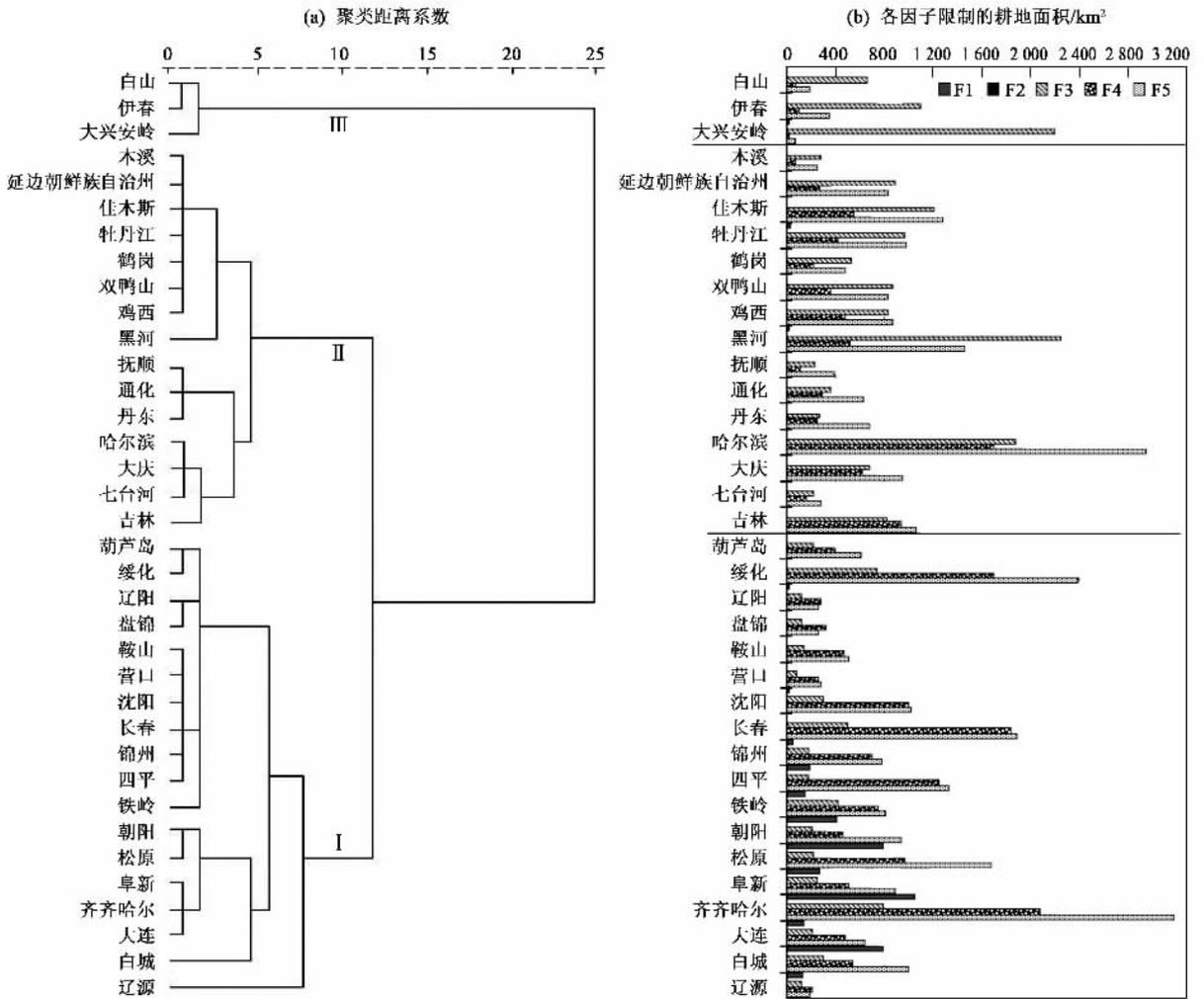
2.2 影响畜禽粪便土地利用适宜性的因子分析

鉴于研究区的范围较大,为进一步分析东北三省畜禽粪便土地利用适宜性的空间差异,并明确影响畜禽粪便耕地施用的关键因子,以便有针对性的

提出区域畜禽粪便土地利用的合理建议.研究采用 Q 型聚类分析法,根据各项因子相应评价标准限制的耕地面积,对东北三省 36 个行政市及地区进行了聚类分析,结果如图 3.

根据聚类分析可以将东北三省的 36 个市及地区大体划分为 3 大区域:西部条带的 18 个市及地区为第 I 类(辽源 ~ 葫芦岛),东部条带的 15 市及地区划分为第 II 类(吉林 ~ 本溪),白山、伊春和大兴安岭 3 个地区为第 III 类.为了分析各分类区域畜禽粪便耕地施用的主要影响因子和特征,图 3 (b)显示了各评价因子的限制面积.

总体看,地形坡度对东北三省耕地施用畜禽粪便的限制影响很小,而其它 4 个因子对 3 类区域畜禽粪便施用耕地面积的影响具有较大差异.西部条带区(I 类)分布着松嫩平原和辽河平原,耕地资源非常丰富,占全区土地面积的 51.7%;该区域适合



F1 ~ F5 是根据各项因子评价标准限制的耕地面积 (km^2), 其中 F1 为土壤质地; F2 为耕地坡度; F3 为耕地与水体距离; F4 为耕地与居民区距离; F5 为与道路距离; F6 为降雨量, 相关法规中没有制定相应的去除限值, 因而图 3(b) 中没有涉及降雨量因子

图 3 东北三省市区各因子限制耕地面积的聚类分析图

Fig. 3 Cluster analysis of removing cultivated land area according to various factors in cities of the three northeastern provinces

施用畜禽粪便的耕地面积为 $107\,987.7\text{ km}^2$, 占耕地总面积的 76%。砂质土壤主要是分布在该区域毗邻内蒙古的 8 个市区, 占其耕地总面积的 2.8%; 西部区域的水体分布相对稀少, 距水体 100 m 安全距离 (F3) 内限制施用粪便的耕地面积为 $5\,126.6\text{ km}^2$, 占区域耕地总面积的 3.6%; 相比较而言, 城镇居民用地和公路、铁路交通分布最为密集, 按照与城镇居民区 250 m (F4) 和与道路 25 m (F5) 的畜禽粪便禁施范围, 所影响的耕地面积分别为 $14\,209\text{ km}^2$ 和 $18\,658.9\text{ km}^2$, 各自占到耕地总面积的 10% 和 13.1%, 因此, 与居民区和道路的安全距离成为限制西部区域耕地施用畜禽粪便的主要因素。

畜禽粪便的土地利用需要结合不同区域的特点。西部地区人口密集, 辽中南是我国最重要的城市

密集区和重工业基地^[22], 工农业都比较发达。这里水资源分布少, 水污染问题十分严重, 区域内的辽河和太子河基本为劣 V 类水质^[23]。虽然距水体 100 m 安全距离内所限制耕地面积较少, 但是该区域畜禽粪便的施用必须以防止和控制对水体的进一步污染为原则。因此, 对施用畜禽粪便耕地与水体安全距离的设定应该更加严格, 建议考虑建立河流沿岸缓冲带来降低畜禽粪便土地利用对水体的污染风险。同时, 西部分布有我国自然环境最好的沙区(松嫩沙地), 尽管“三北”防护林的建成使部分地区的土地沙漠化得到治理, 但总体上沙漠化土地仍在增加^[24, 25], 西部黑土区的水土流失问题也较为严重^[26]。因此, 应该采取有效的技术和工程措施合理施用畜禽粪便, 来控制 and 减少该区域土壤沙化和水

土流失,以提高耕地施用畜禽粪便的适宜性。

东部条带区(Ⅱ类)除黑龙江东部的三江平原区,其它区域地势相对较高(图1),耕地资源相比西部区域分布少,平均占其土地面积的30.7%。东部条带区(Ⅱ类)适宜施用畜禽粪便的耕地面积为100 519.5 km²,占到耕地总面积的82.3%。分析东部区域耕地施用粪便的限制因子,其城镇居民用地(F4)分布相比西部区域少的多,该因子限制的耕地面积为6 983.2 km²,占耕地总面积的5.7%;与西部不同,该区域水体分布多,水体100 m安全距离(F3)内限制施用粪便的耕地面积为12 278.9 km²,占耕地总面积的10.1%。道路(F5)限制的耕地也占到了11.4%。总体上看,耕地与水体和道路的距离成为限制东部区域耕地施用畜禽粪便的关键因子,而与居民区的距离对该区域畜禽粪便的耕地施用也有一定的限制影响。该区域内辽宁东部和黑龙江中部耕地施用粪便的适宜性最差,主要原因是这里降雨量较大[图2(b)],水体分布非常集中(图1),从而降低了该地区畜禽粪便施用的适宜性。

第Ⅲ类区域(白山、伊春和大兴安岭)是东北三省典型的山区林区(白山地处长白山区,伊春位于小兴安岭林区),耕地分布极少,仅为其土地面积的3.8%。该地区城镇居民区(F4)分布很少,所限制的耕地面积为185.8 km²,占耕地总量的4.2%;道路(F5)限制的耕地占13.7%(面积为603.3 km²);而水体分布最为密集,水体100 m安全距离(F3)内限制施用粪便的耕地面积为3960.8 km²,占其耕地面积的比例高达90.1%。该地区适合施用畜禽粪便的耕地面积很小(3435.6 km²),但由于耕地总量非常少,适宜耕地的比例高达78.2%。由此可见,与水体的距离是制约该地区耕地施用畜禽粪便最主要的影响因子,其次,与道路的距离对耕地施用粪便的限制也较大。

第Ⅱ类和第Ⅲ类区域内水资源丰富,尤其是白山、伊春和大兴安岭等山区林区水网密集(图1),是松花江流域主要河流的源头,这部分区域的水体对污染源更为敏感,对耕地施用粪便的要求应更为严格。辽宁和吉林东南部为山地丘陵区(图1),耕地坡度较大,加上较高的降雨量,容易使耕地施用的粪肥流失而引起地表水或地下水污染。该地区畜禽粪便耕地施用的适宜性相对偏低,应该采取有效的粪便管理措施(如适时、适量施用,多次少量施用;避开雨季施用;深施等)来控制粪便土地利用的环境污染和提高畜禽粪便耕地施用的适宜性^[2,4,6,27-32]。

由以上对各类区域影响因子的分析来看,作为我国人均耕地资源最为丰富的地区,东北三省土壤质量比较好,地形坡度和土壤质地对耕地施用畜禽粪便的影响不大。与居民区的安全距离(F4)主要影响东部和西部地区畜禽粪便的耕地施用,与道路的距离(F5)对东北三省耕地施用畜禽粪便有普遍的限制影响,与水体的安全距离(F3)是东部地区和典型山区林区需要重点关注的环境影响因素,而降雨量(F6)是影响耕地施用畜禽粪便适宜性地区差异的主要因子。

2.3 东北三省畜禽养殖可发展潜力估算

各地区可施用畜禽粪便的耕地面积决定着其可承载和消纳畜禽粪便的量,从以上分析可见,东北三省各地区适宜施用畜禽粪便耕地的空间分布差异较大。为充分了解和掌握研究区域畜禽养殖现状及未来发展的可行性,以各市区现有适宜施用畜禽粪便的耕地面积为上限,分别以欧盟国家对畜禽粪便土地利用时N、P₂O₅的限量值为指标^[33]。耕地最大施肥量为170 kg·(hm²·a)⁻¹(以N计)和80 kg·(hm²·a)⁻¹(以P₂O₅计),对各地区畜禽养殖最大承载量进行估算,最终养殖量均以猪的标准头数表示,具体计算方法参看文献[34]。结果见表3。

由于最大可承载量与粪便适宜施用区的耕地面积和适宜值有关,因此与前面的论述一致,东北三省畜禽养殖可承载量大的区域主要分布在黑龙江省的西南部地区,其次是吉林省西部地区,而辽宁省(尤其是东部地区)较少,典型山区林区地区最小。按各省耕地可承载畜禽水平来看,黑龙江>吉林>辽宁(表3)。

表3可以看出,虽然三省的现有养殖量基本相当,但是由于辽宁和吉林两省的耕地面积远小于黑龙江省,所以辽宁省和吉林省的养殖密度较大。根据现有的养殖量核算,如果以N为衡量指标,36个市及地区的现有养殖量都没有超过其耕地的最大可载畜量,都具有不等的发展空间(从辽源的18.8万头到齐齐哈尔的2 249万头)。但是,畜禽粪便的土地施用量通常以粪便中P₂O₅为衡量指标^[2,27],因为P是引起水体富营养化和藻类暴发最重要的养分因子^[17,35-37]。以P₂O₅为指标衡量,36个市及地区中有11个市的养殖量已经超过其最大畜禽可承载量,并且主要集中在西部条带区(其中9个市区位于Ⅰ类西部区域,1个位于Ⅱ类东部区域,1个位于第Ⅲ类山区林区)内的辽宁中部和吉林中部地区。各类区域未来畜禽养殖发展的平均盈余量分别为Ⅰ类西

表3 东北三省各市区畜禽养殖最大承载量估算

Table 3 Estimation of maximum carrying capacity of animal production in cities of the three northeastern provinces

省区	市区	以 N 为指标(万头)			以 P ₂ O ₅ 为指标(万头)		
		最大可载畜量	现有养殖量	盈亏量	最大可载畜量	现有养殖量	盈亏量
辽宁	沈阳	608.8	359.6	249.2	387.6	544.3	-156.7
	大连	259.8	148.9	111.0	165.4	273.6	-108.2
	鞍山	251.3	138.0	113.3	160.0	232.3	-72.3
	抚顺	213.0	52.3	160.7	135.6	90.3	45.4
	本溪	143.6	48.6	95.0	91.4	84.2	7.2
	丹东	299.1	56.7	242.4	190.4	101.2	89.2
	锦州	415.6	176.2	239.4	264.6	319.0	-54.4
	营口	164.4	56.3	108.0	104.6	86.1	18.5
	阜新	507.0	84.9	422.0	322.8	154.2	168.6
	辽阳	139.7	43.8	95.9	89.0	78.3	10.7
	盘锦	142.2	19.2	123.1	90.6	37.7	52.9
	铁岭	414.9	147.8	267.1	264.2	286.6	-22.4
	朝阳	474.1	151.6	322.5	301.8	245.1	56.7
	葫芦岛	247.5	101.6	145.9	157.6	172.8	-15.2
	总量	4 281.0	1 585.5	2 695.5	2 725.6	2 705.7	20.0
	平均值	305.8	113.3	192.5	194.7	193.3	1.4
	养殖密度(头/公顷适宜耕地)	7.9	2.9	5.0	5.0	5.0	0.0
吉林	长春	1 176.5	499.7	676.9	749.1	928.7	-179.7
	吉林	619.5	276.7	342.8	394.4	515.1	-120.6
	四平	733.3	372.9	360.4	466.8	648.1	-181.3
	辽源	91.5	72.7	18.8	58.2	135.1	-76.9
	通化	299.7	92.2	207.5	190.8	170.5	20.3
	白山	72.4	46.3	26.1	46.1	80.5	-34.4
	松原	1080.0	165.2	914.7	687.6	277.3	410.3
	白城	789.7	143.8	645.9	502.8	225.2	277.6
	延边朝鲜族自治州	378.0	58.3	319.7	240.7	107.2	133.5
	总量	5 240.6	1 727.8	3 512.8	3 336.5	3 087.7	248.8
	平均值	582.3	192.0	390.3	370.7	343.1	27.6
养殖密度(头/公顷适宜耕地)	8.3	2.7	5.5	5.3	4.9	0.4	
黑龙江	哈尔滨	1 773.8	335.9	1 437.9	1 129.3	620.5	508.8
	齐齐哈尔	2 530.1	281.1	2 249.0	1 610.8	490.5	1 120.3
	鸡西	904.1	54.1	850.0	575.6	94.2	481.4
	鹤岗	533.2	18.7	514.6	339.5	34.2	305.3
	双鸭山	953.4	55.2	898.2	607.0	100.9	506.1
	大庆	682.1	140.8	541.4	434.3	240.1	194.1
	伊春	240.5	37.2	203.3	153.1	59.8	93.4
	佳木斯	1 429.9	84.4	1 345.5	910.4	162.8	747.6
	七台河	269.1	30.3	238.8	171.3	54.3	117.0
	牡丹江	666.5	78.2	588.4	424.4	142.6	281.8
	黑河	1 598.6	44.6	1 554.0	1 017.8	72.0	945.8
	绥化	1 802.8	292.3	1 510.5	1 147.8	543.1	604.7
	大兴安岭	60.4	15.0	45.4	38.5	21.8	16.7
	总量	13 444.5	1 467.8	11 977.0	8 559.8	2 636.8	5 923.0
	平均值	1 034.2	112.9	921.3	658.4	202.8	455.6
养殖密度(头/公顷适宜耕地)	8.9	1.0	7.9	5.7	1.7	3.9	

部区域(辽源 ~ 葫芦岛)103.0 万头猪、Ⅱ类东部区域(吉林 ~ 本溪)284.2 万头猪、Ⅲ类区域(白山、伊春和大兴安岭)25.2 万头猪。从分省的情况看,辽宁省的现有畜禽养殖量已基本达到其最大承载量,吉林省的养殖量也接近其最大可承载水平,而黑龙江

省的发展盈余量还较大,这与以前的研究结果基本一致^[34]。

综上所述,东北三省东部区域的畜禽养殖还有较大的发展空间,而西部区域集约化养殖业进一步发展的空间相对较小,尤其是辽宁中部和吉林中部

地区的养殖量已经超出了耕地 P_2O_5 承载能力的城市,应该适度控制养殖业发展,或者从调整养殖类型和数量 2 个方面进行规划和布局,尤其对于粪便磷排放较高的畜种应该加以限制。

3 结论

(1) 综合考虑自然、环境、社会和经济因素,东北三省适合施用畜禽粪便的耕地面积为 211 942.7 km^2 ,占耕地总面积的 78.9%,主要分布在黑龙江和吉林省的大部分地区。

(2) 地形坡度和土壤质地对东北三省耕地施用畜禽粪便的限制影响很小,耕地与居民区的安全距离主要影响东部和西部地区畜禽粪便的耕地施用,与道路的距离对东北三省耕地施用畜禽粪便有普遍的限制影响,与水体的距离是东部地区和典型山区林区需要重点关注的环境影响因素,而降雨量是影响耕地施用畜禽粪便适宜性地区差异的主要自然因子。

(3) 西部地区耕地施用畜禽粪便一定要加强防止和控制对水体的污染风险。东部地区畜禽粪便耕地施用的适宜性相对偏低,应该采取有效的粪便管理措施以控制粪便土地利用的环境污染和提高畜禽粪便耕地施用的适宜性。

(4) 基于适宜施用畜禽粪便的耕地面积和现有畜禽养殖水平分析,东北三省各地区畜禽养殖可发展空间的差异较大。东部区域还有较大的畜禽养殖发展空间,西部区域和典型山区林区内有 10 个城市的畜禽养殖量超出其耕地 P_2O_5 的承载能力,应该适度控制和调整养殖业发展。

参考文献:

- [1] Younos T M. Manure management and pollution prevention : challenges for 1990s[J]. *Water Environ Tech* , 1990 ,2(3) : 54-57.
- [2] Eghball B ,Power J F. Beef cattle feedlot manure management [J]. *J Soil Water Conserv* ,1994 **49** :113-122.
- [3] Daniel T C ,Sharpley A N ,Edwards D R ,et al. Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorus management [J]. *J Soil Water Conserv* ,1994 **49** :30-37.
- [4] Couillard D ,Li J F. Assessment of manure application effects upon the run-off water quality by algal assays and chemical analysis[J]. *Environ Pollut* ,1993 **80** :273-279.
- [5] 国家环境保护总局自然生态保护司.全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M].北京:中国环境科学出版社,2000.1-10.
- [6] 王晓燕,汪清平.北京市密云县耕地畜禽粪便负荷估算及风险评价[J].*农业生态环境* 2005 **21**(1) :30-34.
- [7] 陈敏鹏,陈吉宁.中国区域土壤表观氮磷平衡清单及政策建议[J].*环境科学* 2007 **28**(6) :1305-1310.
- [8] 张绪美,董元华,王辉,等.江苏省农田畜禽粪便负荷时空变化[J].*地理科学* 2007 **27**(4) :597-601.
- [9] 张绪美,董元华,王辉,等.中国畜禽养殖结构及其粪便 N 污染负荷特征分析[J].*环境科学* 2007 **28**(6) :1311-1318.
- [10] Safley Jr L M. Managing animal wastes : best management practices[J].*J Soil Water Conserv* ,1994 **49** :57-61.
- [11] 王洛林,魏后凯.东北地区经济振兴的战略思路及政策措施[J].*学术动态* 2006 **14** :2-24.
- [12] 刘彦随,彭留英,陈玉福.东北地区土地利用转换及其生态效应分析[J].*农业工程学报* 2005 **12**(11) :175-177.
- [13] 张平宇,马延吉,刘文新,等.振兴东北老工业基地的新型城市化战略[J].*地理学报* 2004 **59**(增刊) :109-115.
- [14] Schmitt M A ,Levins R A ,Richardson D W. Manure application planner (MAP) : software for environmental and economical nutrient planning [J]. *J Prod Agric* ,1997 **10** :441-446.
- [15] Ma K ,Ogilvie J R. MCLONE3 : a decision support system for management of liquid dairy and swing manure[A]. In : Orlando , Florida , USA : 7th International Conference on Computers in Agriculture[C]. 1998.
- [16] Koelshch R. Manure nutrient inventory spreadsheet instructions [M]. *Biological System Engineering* , NE , USA : University of Nebraska-Lincoln ,1999.
- [17] Basnet B B ,Armando A A ,Steven R R. Geographic information system based manure application planning [J]. *J Environ Manage* 2002 **64** :99-113.
- [18] 李帷,李艳霞,林春野,等.北京市畜禽粪便土地利用适宜性分析[J].*环境科学学报* 2009 **29**(4) :882-889.
- [19] HJ/T 81-2001, 畜禽养殖业污染防治技术规范[S].
- [20] 主席令 49 号,中华人民共和国水土保持法[S].
- [21] Ross A D. Guidelines for the use of sewage sludge on agricultural land [M]. Australia : New South Wales Agriculture and Fisheries ,1989.
- [22] 宋玉祥,陈群元. 20 世纪以来东北城市的发展及其历史作用[J].*地理研究* 2005 **24**(1) :89-96.
- [23] 国家环境保护部. 2007 年中国环境状况公报[R].北京:国家环境保护部 2008.3-8.
- [24] 任洪玲,廉毅,高枫亭,等.中国东北西部地区荒漠化发展前沿区域的遥感研究[J].*第四纪研究* 2002 **22**(2) :136-140.
- [25] 李宝林,周成虎.东北平原西部沙地近 10 年的沙质荒漠化[J].*地理学报* 2001 **56**(3) :307-314.
- [26] 刘卓,刘昌明.东北地区水资源利用与生态和环境问题分析[J].*自然资源学报* 2006 **21**(5) :700-707.
- [27] Sutton A L. Proper animal manure utilization[J]. *J Soil Water Conserv* ,1994 **49** :65-70.
- [28] Khaleel R ,Reddy K R ,Overcash M R. Transport of potential pollutants in run-off water from land areas receiving animal wastes : a review[J]. *Water Res* ,1980 **14** :421-436.
- [29] Veenhuizen M A ,Eckert D J ,Elder K , et al. Ohio livestock manure and wastewater management guides[M]. Ohio , USA : Ohio State University Extension ,1992. Bulletin 604 ,Sections 15 and 17.

- [30] Waskom R M. Best management practices for manure utilization [M]. USA : Colorado State University Cooperative ,1994.
- [31] Gupta R K ,Rudra R P ,Dickinson W T ,*et al.* Surface water quality impacts of tillage practices under liquid swine manure application[J]. J Am Water Resour As ,1997 ,**33** :681-687.
- [32] Liu F ,Mitchell C C ,Odom J W ,*et al.* Effects of swine lagoon effluent application on chemical properties of a loamy sand[J]. Bioresource Technol ,1998 ,**63** :65-73.
- [33] Henkens P L C M ,Van Keulen H. Mineral policy in the Netherlands and nitrate policy within the European Community [J]. Neth J Agr Sci ,2001 ,**49** :117-134.
- [34] 李帷 ,李艳霞 ,张丰松 ,等. 东北三省畜禽养殖时空分布特征及粪便养分环境影响研究[J]. 农业环境科学学报 ,2007 ,**26** (6) :2350-2357.
- [35] Young W J ,Marston F M ,Davis J R. Nutrient exports and land use in Australian catchments[J]. J Environ Manage ,1996 ,**47** :165-183.
- [36] Weaver D ,Austin N ,McCulloch M ,*et al.* Phosphorus in the landscape : diffuse sources to surface waters[M]. Canberra , Australia :Land and Water Resources Research and Development Corporation ,1997. 26-30.
- [37] Herath G. Freshwater algal blooms and their control : comparison of the European and Australian experience [J]. J Environ Manage ,1997 ,**51** :217-227.