

缙云山不同土地利用类型地表径流水质评价^{*}

刘登峰¹, 齐实¹, 韩小杰¹, 吴云², 陈林²

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 重庆缙云山国家级自然保护区管理局, 重庆 400700)

摘 要:采用基于 Matlab 的 BP 神经网络并结合单因素分析和综合指数法,对缙云山的 5 个不同实验小区地表径流和大气降水的水质数据进行评价,得出不同土地利用类型对地表径流水质的影响:相对于大气降水 I 类水,缙云山 5 个不同土地利用类型的水质总体在 III 类水以上,其中农用地、楠竹林地表径流的水质达到 I 类水;混交林的地表径流达到 II 类水;阔叶林和灌木林地地表径流的水质达到 III 类水。

关键词:BP 神经网络; 综合指数法; 水质评价; 缙云山

中图分类号:F301.24;P342

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)01-0126-05

Surface Runoff Quality Evaluation of Several Land Uses in Jinyun Mountain

LIU Deng-feng¹, QI Shi¹, HAN Xiao-jie¹, WU Yun², CHEN Lin²

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Management Bureau of Jinyunshan National Nature Protection Region in Chongqing City, Chongqing 400700, China)

Abstract:Based on BP network model on Matlab platform and combining mono-factor analysis and synthetic index method, it's evaluated that precipitation and surface runoff quality in areas studied of five land uses in Jinyun Mountain. The conclusion is that compared to quality classification I of precipitation, among five land uses the surface runoff quality of agricultural land and bamboo forest is best and the value is I; the conifer-broadleaved mixed forest's is in the middle and the value is II; the quality of broad-leaved forest and shrub is worst and the value is III.

Key words:BP neural network model; synthetic index method; water quality evaluation; Jinyun Mountain

目前国内外用于水质综合评价的方法很多,如模糊综合评价^[1]、灰色关联分析^[2]及物元模型法等^[3]。由于影响水质的因素很多,而且因素与水质类别之间通常存在复杂的非线性关系,所以迄今还没有一种统一和公认的方法。本文采用单项因子评价、BP 神经网络和综合指数法 3 种方法对缙云山水质进行评价。单项因子评价是指分别对单个指标进行分析评价。该方法计算简便,且通过评价结果能直观地反映水质中哪一类或哪几类因子超标,同时可以清晰地判断出主要污染因子和主要污染区域。但是由于是对单个水质指标独立进行评价,因此得到的评价结果不能全面地反映地下水质量的整体状况^[4]。

综合指数评价是对整体水体质量的定量描述,只要项目、标准、监测结果可靠,综合评价从总体上

看是可以基本反映污染的性质和程度的。而且对于宏观尺度而言,综合指数评价方法计算简便,便于进行水体之间或同一水体时间上的基本污染状况和变化的比较^[5]。

BP 网络是一种多层前馈神经网络,名字源于神经网络权值,调整规则采用的是后向传播学习算法。BP 网络是一种具有三层或三层以上的神经网络,包括输入层、中间层(隐层)和输出层。上下层之间实现全连接,而每层神经元之间无连接。当一对学习样本提供给网络后,神经元的激活值从输入层经中间层向输出层传播,在输出层的各神经元获得网络的输入响应。接下来按照减少目标输出与实际误差的方向,从输出层经过各中间层逐层修正连接权值,最后回到输入层,这种算法称为“误差逆传播算

* 收稿日期:2008-06-02

基金项目:国家“十一五”科技攻关项目“重庆北部水源地水源涵养林构建技术试验示范”

作者简介:刘登峰(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向:水土保持。E-mail:19821022aaa@163.com

通信作者:齐实(1964-),男,副教授,主要研究方向:水土保持、流域治理。E-mail:qishi@bifu.edu.cn

法”,即 BP 算法。随着这种误差逆的传播修正不断进行,网络对输入模式响应的正确率也不断上升^[6]。用 BP 神经网络进行水质评价,其训练样本为水质分级标准。模型一旦经训练学习完成后,可以用于各类环境的水质评价,具有泛化性。神经网络因其所需参数均是训练学习所得,故其较传统的水质评价更具有客观性、合理性、取得较好的精确性^[7]。

1 实验区概况及数据获取

缙云山属于中亚热带东部偏湿性季风气候。雨量充沛但分布不均,年均降水量 1 611.8 mm,最高年降雨量 1 783.8 mm,冬半年(10 月 - 次年 3 月)降水量 368.0 mm,占全年降水量的 22.8%,夏半年(4 - 9 月)降水量 1 243.8 mm,占全年的 77.2%;年均气温 13.6℃,最热月(8 月)平均气温 24.3℃,最冷月(1 月)平均气温 3℃~10℃,极端气温 - 4.6℃,

10℃的年积温为 4 272.4℃;年平均湿度 87%,年均日照 1 293.9 h,年均蒸发量 777.1 mm,7、8 月蒸发量 255.4 mm,占全年的 32.8%。

在缙云山选择有代表性的 5 个径流小区,它们分别为针阔混交林、常绿阔叶林、楠竹林、灌木林和农用地径流小区,小区面积为 5 m ×20 m,小区四周用水泥墙围起,水泥墙截留至母岩层,且在集流槽上、下端的墙体留有过水孔,分别用钢管将地表径流引入观测房中。径流小区的植被状况和土壤基本性质详见表 1、2。

选取 5 个不同林地观测房地表径流和大气降水(用作对比)水质数据的年平均值,选取溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)、总氮(TN)、总磷(TP)和锌离子(Zn²⁺)为评价指标。监测结果见表 3,评价标准采用 GB3838 - 2002《地表水环境质量标准》^[8],对应指标见表 4。

表 1 实验小区植被基本状况

项 目	针阔混交林	常绿阔叶林	楠竹林	灌木林	农用地
海拔/ m	830	835	820	840	840
坡度/ (°)	22	28	24	10	10
林分郁闭度	0.75	0.85	0.8	0.6	
主要树种	马尾松、大头茶、山矾、白毛新木姜子	大头茶、山矾、白毛新木姜子、桫欏	毛竹	山矾、继木	

表 2 实验小区土壤基本性质

项 目	针阔混交林	常绿阔叶林	楠竹林	灌木林	农用地
土壤类型	山地黄壤	山地黄壤	山地黄壤	山地黄壤	山地黄壤
土层厚度/ cm	62.44	54.18	60.27	96.82	93.14
总孔隙度/ %	66.25	69.31	58.69	57.84	36.52
毛管孔隙/ %	47.21	49.57	41.53	38.91	30.25
非毛管孔隙/ %	19.04	19.74	17.16	18.93	6.27
表层有机质/ %	54.55	70.35	36.87	59.34	47.32

表 3 实验小区水质监测结果

样品名	DO	COD	BOD	TP	TN	Zn ²⁺
阔叶林地表径流	6.77	23.18	2.47	0.018	1.47	0.14
混交林地表径流	7.22	13.14	2.05	0.026	1.38	0.08
楠竹林地表径流	6.56	9.27	2.09	0.028	0.78	0.02
灌木林地表径流	7.16	13.14	1.57	0.012	1.55	0.08
农用地地表径流	7.23	3.09	1.63	0.033	0.74	0.03
大气降水	7.59	0.63	0.01	4.09	0.95	0.02

表 4 地表水评价分级标准

指标	I	II	III	IV	V
DO	7.5	6	5	3	2
COD	15	15	20	30	40
BOD	3	3	4	6	10
TP	0.02	1	2	3	4
TN	0.2	1	1	1.5	2
Zn ²⁺	0.5	1	1	2	2

2 水质单因素分析

根据监测结果表 3 和评价分级标准表 4 可以得出各个指标对应的分级标准表 5。

化学需氧量(DO)在 5 种不同类型中均为 II 类水指标,而大气降水为 I 类水指标,相对于大气降水,消耗量为:楠竹林 1.03 > 阔叶林 0.82 > 灌木林

0.43 > 混交林 0.37 > 农用地 0.36。DO 的大小受温度和水体中有机物含量的影响,如果凋落物厚而多,在形成地表径流的过程中携带了大量的有机物,有机物在分解过程中要消耗氧,使地表径流中 DO 降低;地表径流中农用地 DO 浓度最高,说明其径流水体含有机物少。

表 5 监测数据对应的分级标准

样品名	DO	COD	BOD	TP	TN	Zn ²⁺
阔叶林地表径流	II	IV	I	I	III	I
混交林地表径流	II	I	I	II	III	I
楠竹林地表径流	II	I	I	II	II	I
灌木林地表径流	II	I	I	I	IV	I
农用地地表径流	II	I	I	I	II	I
大气降水	I	I	I	I	II	I

化学需氧量(COD)是指在一定的条件下用强氧化剂氧化水样时,所消耗该氧化剂量相当的氧的浓度,它的大小可以反映水体中有机物的含量。除了阔叶林为 IV 类水指标,其他 4 种和大气降水都为 I 类水指标,因为缙云山气温较高和雨量丰富,阔叶林下枯落物层厚,凋落物分解速率较高,较多的有机质被分解和淋溶,使其含量较高,并出现一定程度的有机污染。

生化需氧量(BOD)是指在好氧条件下,微生物分解存在于水中的某些可氧化物质,主要是有机物质所进行的生物化学过程中消耗溶解氧的量,可反映水体中可被微生物氧化的有机物的量。地表径流生化需氧量大于大气降水,是由于雨水在流经林冠层、凋落物层而形成地表径流的过程中淋洗了部分有机物质的原因,但宏观上都达到 I 类水指标。

总磷(TP)地表径流中 P 的含量与雨水对林冠含 P 物质的淋洗、凋落物的分解和吸附等有关,不同树种表现出不同的变化趋势。在混交林和楠竹林

为 II 类水指标,在其他 3 种类型和大气降水中均为 I 类水指标。

总氮(TN)在灌木林为 IV 类水指标,阔叶林和混交林为 III 类水指标,在楠竹林、农用地和大气中为 II 类水指标。对氮含量影响的因素比较多,林冠层截留淋溶、地表枯落物和土壤层等因素相关。

锌(Zn²⁺)在地表径流比大气降水含量高,但都为 I 类水指标,这种离子浓度的增加可能是 Zn²⁺ 的冠层洗脱,它与 H⁺ 离子发生了交换反应被置换出来,也有一部分是随树冠层生长的代谢物一起排放出来的。

3 综合指数法

选用综合污染指数法进行评价,其计算公式如下:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad P_i = \frac{c_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: P ——水综合污染指标; c_i ——某污染物的实测浓度(mg/L); S_i ——某污染物地面水标准浓度(第 III 类水质标准)(mg/L); n ——水质参数数量。对 DO 的单项质量指标 P_{DO_i} 计算公式^[9]: 当 DO ≥ DO_{si} 时, P_{DO_i} = (DO_f - DO_{ci}) / (DO_f - DO_{si}); 当 DO < DO_{si} 时, P_{DO_i} = 10 - 9DO_{ci} / DO_{si}, 其中 DO_f = 468 / (31.6 + T), DO_{ci} 表示溶氧实测值, DO_{si} 表示溶氧评价标准值, DO_f 表示某水温、气压条件下的饱和溶解氧浓度, T 为水温, (T 取平均值, 20)。对应的水质分级标准为表 6。

表 6 地表水水质分类标准

P 值	水质类别	P 值	水质类别
0.20	I 清洁	IV 1.01 ~ 2.00	重度污染
0.21 ~ 0.40	II 尚清洁	V 2.01	严重污染
0.41 ~ 1.00	III 轻度污染		

计算结果见表 7。

表 7 综合指数法评价结果

不同林地	阔叶林地表径流	混交林地表径流	楠竹林地表径流	灌木林地表径流	农用地地表径流	大气降水
P 值	0.296	0.512	0.400	0.522	0.657	0.564
评价等级	II	III	II	III	III	III

从表 7 可以看出,阔叶林和楠竹林的地表径流水质指标为 II 类水指标;混交林、灌木林、农用地大气降水的水质指标为 III 类水,属于轻度污染。

4 BP 神经网络评价

4.1 各个神经元的确定

在 BP 神经网络中,一般把实测的水质参数作为输入层神经元,输出层即为水质类别用一个神经元表示,中间层要反复比较确定,建立的网络模型见图 1。

4.2 标准化处理

对收集到的训练样本,一般不直接拿来使用,要先进行一定的标准化处理。但由于各分指标具有不同的量纲,且类型不同,故指标间具有的不可公度性难以直接进行比较。因此在综合评价前,必须把这些分指标按某种规则归一化到某一无量纲区^[10]。

标准化处理的方法很多,可采用初值化、级差化或等比例变换方法,因为 BP 网络中 Sigmoid 函数的输出范围在 0 ~ 1 之间,所以一般也把数据归一到

[0,1]之间。对于成本型因子(如 BOD、COD) ,其数值越大表示水质越差 ,可用下式标准化 :

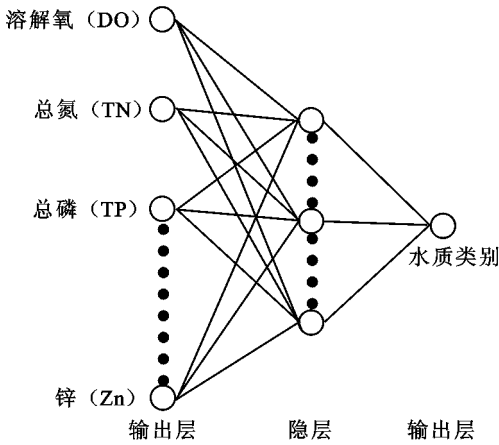


图 1 水质评价的 BP 网络结构

$$Z = \begin{cases} 1 & x_{ij} > s_{ik} \\ x_{ij} / s_{ik} & 0 \leq x_{ij} \leq s_{ik} \\ 0 & x_{ij} < s_{ik} \end{cases} \quad (2)$$

表 8 模型的水质分级标准

级别	I	II	III	IV	V
数据区间	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0

根据表 8 的模型水质分级指标 ,对通过插值得到的分级标准数值进行标准化处理 ,在 Matlab 中编写计算公式 ,得到标准化后的数据 ,再将相对应的输出值写在其中以便于 BP 网络运算 ,见表 9。

表 9 标准化后的水质分级标准

级别指标	DO	COD	BOD	TP	TN	Zn ²⁺
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1000	0.0000	0.1875	0.1500	0.0025	0.0500	0.1250
0.2000	0.0000	0.3750	0.3000	0.0050	0.1000	0.2500
0.3000	0.1000	0.3750	0.3000	0.1275	0.3000	0.3750
0.4000	0.2000	0.3750	0.3000	0.2500	0.5000	0.5000
0.5000	0.2665	0.4375	0.3500	0.3750	0.5000	0.5000
0.6000	0.3333	0.5000	0.4000	0.5000	0.5000	0.5000
0.7000	0.4665	0.6250	0.5000	0.6250	0.6250	0.7500
0.8000	0.6000	0.7500	0.6000	0.7500	0.7500	1.0000
0.9000	0.6665	0.8750	0.8000	0.8750	0.8750	1.0000
1.0000	0.7333	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

为了便于仿真计算使用 ,将 5 个不同径流小区的水质监测数据根据公式 (2) 和 (3) 用同样的方法进

表 11 水质评价结果及等级

不同林地	阔叶林地表径流	混交林地表径流	楠竹林地表径流	灌木林地表径流	农用地地表径流	大气降水
评价结果	0.5827	0.3618	0.1790	0.4166	0.1029	0.0783
评价等级	III	II	I	III	I	I

根据表 11 得到 :在 5 种不同土地利用类型中 ,农用地和楠竹林地表径流为 I 类水 ;混交林地表径

式中 : x_{ij} ——实测数据 ; s_{ik} ——水质评价标准中最差的一级数值。

对于效益型因子(如 DO) ,数值越大表示水质越好 ,可用下式标准化 :

$$Z = \begin{cases} 0 & x_{ij} > s_{ik} \\ 1 - x_{ij} / s_{ik} & 0 \leq x_{ij} \leq s_{ik} \\ 0 & x_{ij} < s_{ik} \end{cases} \quad (3)$$

式中 : x_{ij} ——实测数据 ; s_{ik} ——水质标准中最好一级数值。

为了保证有足够的训练样本和训练精度 ,需将分级标准进行插值加密 ,可采用线性插值的方法分级标准加密 1 倍 ,即把标准分为更小的级别。在 Matlab 中采用 $Y_i = \text{interp1}(x, y, x_i, 'linear')$,进行线性插值计算。由于 BP 网络中 Sigmoid 函数的输出范围在 0~1 之间 ,所以对模型的输出值也要在 [0,1] 上划分 ,对应于水质标准的 5 个级别 ,可得到与模型输出相对应的分级环境标准 ,见表 8。

行标准化处理 ,得到标准化的监测结果表 10。

表 10 准化后的水质监测结果

样品名	DO	COD	BOD	TP	TN	Zn ²⁺
阔叶林地表径流	0.097	0.580	0.247	0.005	0.735	0.070
混交林地表径流	0.037	0.329	0.205	0.007	0.690	0.040
楠竹林地表径流	0.125	0.232	0.209	0.007	0.390	0.010
灌木林地表径流	0.045	0.329	0.157	0.003	0.775	0.040
农用地地表径流	0.036	0.077	0.163	0.008	0.370	0.015
大气降水	0.000	0.102	0.095	0.007	0.315	0.005

4.3 BP 网络设计

(1) 把水质评价分级标准作为训练样本将其输入网络的输入节点输入到网络 ;(2) 创建 BP 神经网络 ;(3) 选择合适的训练函数及参数 ;(4) 由网络的输出节点输出水质评价级别 ;(5) 再输入水质 6 项评价指标 ;(6) 进行 MA TLAB 仿真设计 ;(7) 通过多次训练 ,误差会达到规定的要求 ,得到水质评价结果 ,根据 BP 网络仿真实际输出的结果与标准等级评价级别的贴进度来确定水质的等级。计算得出的结果见表 11。

流为 II 类水 ;阔叶林和灌木林为 III 类水 ;同时大气降水也是 I 类水。

5 结论和建议

从单因素角度出发,阔叶林的 COD 达到 IV 类水指标,缙云山气温较高和雨量丰富,阔叶林下枯落物层厚,凋落物分解速率较高,较多的有机质被分解和淋溶,使其含量较高,并出现一定程度的有机污染。同时 5 种不同土地利用类型 TN 的含量比较高,而灌木林达到 IV 类水指标,具体原因还有待于进一步研究。综合指标法水质的结果皆为 III 类水,BP 神经网络运行多次的结果为缙云山 5 个不同土地利用类型的水质总体也在 III 类水以上,其中大气降水、农用地、楠竹林地表径流的水质达到 I 类水;混交林的地表径流达到 II 类水,阔叶林和灌木林地地表径流的水质达到 III 类水。

以大气降水为例,6 个指标中有 1 个指标为 II 类水指标,其余皆为 I 类水指标,BP 神经网络综合评价等级为 I 类水而综合指数法评价结果为 III 类水,因而 BP 神经网络和单因素评价结果具有更好的吻合性。因此在水质评价中 BP 神经网络相对于综合指数法更准确。BP 神经网络对水质评价是可行的,同时结合单因素分析,将对水质评价的准确性有提高。但由于影响 BP 神经网络学习和训练质量的因素有学习率、隐含层神经元的个数等。而这些正是引起 BP 神经网络局部收敛和收敛速度慢的原因。因此在创建神经网络时,应根据实际情况,选择最佳的学习率、训练函数及其它参数。

参考文献:

- [1] 国家环境保护总局监督管理司. 中国环境影响评价[M]. 北京:化学工业出版社,2000:217-243.
- [2] 吴业文,戈建民,黄奕龙. 应用灰色关联分析进行城市地表水环境质量评价[J]. 世界地质,2000,19(1):53-56.
- [3] 朱继业,窦贻俭,方红松. 动态系统物元模型在综合水质预报中的研究和应用[J]. 城市环境与城市生态,1999(2):51-53.
- [4] 苏耀明,苏小四. 地下水水质评价的现状与展望[J]. 水资源保护,2007,23(2):4-12.
- [5] 梁德华,蒋火华. 河流水质综合评价方法的统一和改进[J]. 中国环境监测,2002,2(18):63-66,64.
- [6] 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2005:99-100.
- [7] 姜申,干晓蓉. 基于 BP 神经网络的水质评价[J]. 云南民族大学学报:自然科学版,2007,16(2):165-167.
- [8] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. GB3828-2002 地表水环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [9] 范立民. 长江徐六泾段渔业水环境现状初步调查[J]. 长江大学学报:自然科学版(农学卷),2007,4(1):36-38.
- [10] 胡晋. 基于 Excel 的 BP 网络法在水质评价应用[J]. 环境监测技术,2005,17(3):18-21.
- [11] 张瑞丰. 精通 MATLAB6.5[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004:95-96.

(上接第 125 页)

- [3] Richard L, Granillo A B. Soil protection by natural vegetation on clear cut forest land in Arkansas[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1985,40(4):379-382.
- [4] 张洪江,程金花,余新晓,等. 贡嘎山冷杉纯林枯落物储量及其持水特性[J]. 林业科学,2003,39(5):147-151.
- [5] 刘向东,吴钦孝,赵鸿雁. 黄土高原油松人工林枯枝落叶层水文生态功能研究[J]. 水土保持学报,1991,5(4):87-91.
- [6] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬. 黄土高原人工油松林水文生态效应[J]. 生态学报,2003,23(2):376-379.
- [7] 刘少冲,段文标,赵雨森. 莲花湖库区几种主要林型枯落物层的持水性能[J]. 中国水土保持科学,2005,3(2):81-86.
- [8] 罗跃初,韩单恒,王宏昌,等. 辽西半干旱区几种人工林生态系统涵养水源功能研究[J]. 应用生态学报,2004,15(6):921-922.
- [9] 韩同吉. 北方石质山区典型林分枯落物层涵养水分特征[J]. 山东农业大学学报:自然科学版,2005,36(2):275-278.
- [10] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬. 黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究[J]. 林业科学,2003,39(1):168-172.
- [11] 郝向春. 灵空山主要森林类型枯落物生物量及持水性[J]. 山西林业科技,2000,12(4):1-2.
- [12] 张振明,余新晓,等. 不同林分枯落物层的水文生态功能[J]. 水土保持学报,2005,19(3):139-143.
- [13] 程金花,张洪江,史玉虎,等. 三峡库区三种林下地被物储水特性[J]. 应用生态学报,2003,14(11):1825-1828.
- [14] 刘尚华,冯朝阳,吕世海,等. 京西百花山区 6 种植物群落凋落物持水性能研究[J]. 水土保持学报,2007,21(6):179-182.
- [15] 张万儒,许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京:中国林业出版社,1986.