

浑河傍河区地下水氮污染来源贡献研究

刘丽雅¹ 何江涛² 王俊杰³

(1. 中兵勘察设计研究院,北京 100053; 2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院水资源与环境工程北京市重点实验室,北京 100083; 3. 水利部发展研究中心,北京 100038)

【摘要】 针对沈阳浑河傍河水源地地表、河流及地下水氮污染情况,利用 Hydrus-1D 实现以点代面模拟过程,计算包气带底部淋滤出水的水量和氮素浓度,并将其作为初始值输入由 Visual Modflow 构建的含水层氮素迁移转化数值模型,实现地表、包气带与含水层系统间模拟计算的结合。此外,结合地下水氮素测试结果,通过均衡公式计算不同地下水氮污染来源的贡献率。模拟结果表明,东南部地下水氨氮的主要污染来源为浑河补给,贡献率为 61.79%;西北部地下水硝酸盐氮的主要污染来源为地表垂向入渗,贡献率为 43.92%。

【关键词】 地下水;氮污染;Hydrus-1D;Visual Modflow;贡献率

【中图分类号】 TU 311.4

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2015.02.002

Contributions to the Source of Groundwater Nitrogen Pollution in Hun River Riparian Zone

Liu Liya¹ He Jiangtao² Wang Junjie³

(1. China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute, Beijing 100053, China;

2. Beijing Key Laboratory of Water Resources and Environmental Engineering, School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Development Research Center of the Ministry of Water Resources of P. R. China, Beijing 100038, China)

【Abstract】 Focused on the nitrogen pollution of the groundwater and river and ground surface of Shenyang Hun river water source area, Hydrus-1D was used to obtain the water volume and nitrogen concentrations at the bottom of the unsaturated zone, which can be considered to represent the regional results as initial values of the aquifer model built by Visual Modflow, which was used to simulate the nitrogen migration and transformation, and these can combine the simulation in top soil, unsaturated zone and aquifer together. In addition, compared with the groundwater sampling test results, the simulating and calculating results mentioned above were used to calculate the contribution rates of various groundwater nitrogen pollution sources by equilibrium formulas. The conclusions suggested that ammonia nitrogen in the southeast part was mainly from Hun River, and the contribution rate was 61.79%; Nitrate nitrogen in the northwest part was mainly from top soil vertical infiltration, and the contribution rate was 43.92%.

【Key words】 groundwater; nitrogen pollution; Hydrus-1D; Visual Modflow; contribution rate

0 引言

地下水氮污染问题极其复杂,主要表现为氮素污染来源的多样性和迁移转化过程的复杂性。包气带是氮素自地表进入地下水的必经之道,含水层是污染物进入地下环境后的主要归宿,因此,准确刻画污染物在包气带中的垂向入渗及其在含水层中的运移,发生各种转化反应,是研究地下水氮污染的先决条件。国内外研究表明,包气带氮素迁移转化研究的深度和区域以小尺度为主,且将地表、包气带和含

水层三者的氮素迁移转化过程结合的研究较少。此外,贡献率计算一般利用污染负荷计算、同位素示踪等方法^[1],研究手段及角度的差异性,使其在实际应用过程中具有一定的局限性。

本文以沈阳市浑河李官堡傍河区为研究区,对地表氮污染进行垂向入渗分区,使用 Hydrus-1D 和 Visual Modflow 构建包气带和含水层氮素迁移转化模型,得到包气带底部淋滤出水的水量和氮素浓度,将其作为初始值输入含水层系统中,实现地表、

包气带与含水层系统间模拟计算的耦合。根据模拟结果及研究区地下水氮污染监测资料,利用均衡公式,计算不同污染来源对地下水氮污染的贡献率,提出有效的地下水污染防治措施,为后续开展有针对性的污染治理工作、保护地下水资源提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于沈阳市于洪区,研究区的范围为北至细河南岸,南至浑河北岸,面积约 36 km²。该研究区属辽河平原北部的浑河冲洪积扇,总体地形较平缓,东高西低。本研究分别于 2011 年 3 月、6 月进行野外调查取样,其水样、土样取样点分布见图 1。

地下水水样检测结果表明,3 月氮素浓度总体高于 6 月氮素浓度,氨氮污染集中于研究区东南部,浓度变化范围为 0.01~13 mg/L;硝酸盐氮污染集中于研究区西北部,浓度变化范围为 0.58~140 mg/L。

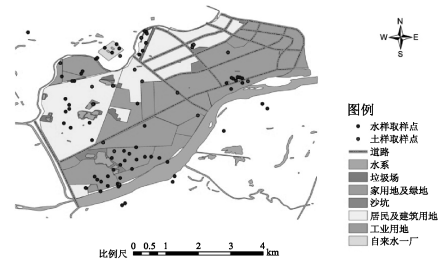


图 1 研究区概况及取样点分布图

2 地表氮污染垂向入渗模拟

2.1 包气带概念模型

由于研究区面积较大,地层岩性、地形地貌、地表污染源等情况复杂,无法直接使用 Hydrus-1D 进行模拟,因此,首先分析氮素在包气带中迁移转化的主控因素,分别选择地层、地表入渗系数、有机氮浓度、氨氮浓度、硝酸盐氮浓度、硝化/反硝化反应等 6 种因素对研究区进行分区处理,取值见表 1。

表 1 研究区参数分区赋值

入渗系数分区	地表入渗系数 ^① /(m·d ⁻¹)	氮素浓度分区	有机氮浓度 ^② /(mg·L ⁻¹)	氨氮浓度 ^② /(mg·L ⁻¹)	硝酸盐氮浓度 ^② /(mg·L ⁻¹)	反应参数分区	硝化反应参数 ^③ /d ⁻¹	反硝化反应参数 ^③ /d ⁻¹
a 区	1.5582	1 区	9.912	1.443	4.600	x 区	0.002~0.02	1.0e ⁻⁵ ~2.0e ⁻⁴
b 区	0.2063	2 区	2.401	0.638	6.100	f 区	1.0e ⁻⁵ ~0.04	1.7e ⁻⁵ ~3.0e ⁻⁴
c 区	0.5193	3 区		0.549	5.900			
		4 区		0.891	5.000			

注:①地表入渗系数通过野外实测获取;②有机氮、氨氮、硝酸盐氮浓度通过野外取样测试获取;③硝化/反硝化反应系数通过水化学分析获取

利用 ArcGIS 生成上述 6 种因素的独立图层后进行叠加,得到研究区模型参数综合分区图,该图将整个研究区分成 23 个子区。每个子区的代码由 6 个参数组成,例如,Ab133x 代表:地层 A 区,入渗系数 b 区,有机氮浓度 1 区,氨氮浓度 3 区,硝酸盐氮浓度 3 区,硝化反应 x 区(见图 2)。



图 2 研究区模型参数综合分区图

2.2 数值模型

Hydrus-1D 是一款可以模拟饱和或非饱和介

质中一维水分、热和溶质的运移过程的软件,在环境、生态、农业等方面得到了广泛应用^[2],本文利用其分别对上述包气带模型中的 23 个子区进行包气带氮素迁移转化模拟,得到包气带底部淋滤出水的氮素分布特征。

2.2.1 水流模型

非饱和孔隙介质中的一维均质(平衡)水流运动可用 Richards 方程描述:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (1)$$

式中: h 为压力水头, m; θ 为体积含水量, m³/m³; t 为时间, s; x 为空间坐标, m; S 为源汇项, 1/s; α 为水流方向与垂向之间的夹角。

假定地表污染物主要通过降雨淋滤作用进入包气带,故水流模型上边界为有地表径流的大气边界条件,下边界为自由排水边界条件,降雨量为沈阳市多年平均降雨量。研究区包气带岩性土壤水分特征曲线参数及渗透系数数值见表 2。

表2 模型中土壤水分特征曲线参数值

岩性	$\theta_r/(m^3 \cdot m^{-3})$	$\theta_s/(m^3 \cdot m^{-3})$	α/m^{-1}	n	$k_s/(m \cdot d^{-1})$	l
砾砂	0.0523	0.3766	3.31	3.1769	100	0.5
粗砂含砾	0.0372	0.3884	4.36	1.7126	35	0.5
细砂	0.0336	0.394	2.5	1.4161	3	0.5
亚砂土	0.065	0.41	7.5	1.89	参照入渗系数分区赋值	0.5
种植土	0.078	0.43	3.6	1.56	参照入渗系数分区赋值	0.5
亚粘土	0.07	0.36	0.5	1.09	0.0505	0.5

2.2.2 溶质运移模型

在水分运移的基础上,Hydrus-1D 采用经典的对流-弥散方程描述饱和-非饱和孔隙介质中的一维溶质运移:

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} + \rho \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\theta D \frac{\partial c}{\partial x}) - \frac{\partial qc}{\partial x} - \Phi \quad (2)$$

式中: c 为溶液液相浓度,mg/L; s 为溶质固相浓度; D 为弥散系数, m^2/s ; q 为体积流动通量密度, m/s ; Φ 为源汇项(代表溶质发生的各种零级、一级及其他

反应), $(mg/L) \cdot s$ 。

本文的溶质运移反应只考虑有机氮、氨氮和硝酸盐氮的化学平衡链式反应,不考虑亚硝酸盐氮^[3]。土壤密度参考不同岩性土壤密度经验值^[4]进行赋值,纵向弥散度为土柱长度的 1/10。第一层土壤设置矿化反应参数,表征有机氮的矿化反应,而第一层以下不存在矿化反应。通过文献资料^[5],进行微调赋值,确定模型中溶质运移特征参数值见表 3。

表3 模型中溶质运移特征参数

物质	自由水中扩散系数 / $(m^2 \cdot d^{-1})$	矿化反应常数 / d^{-1}	硝化反应常数 / d^{-1}	反硝化反应常数 / d^{-1}
有机氮	0.000432	0.38		
氨氮	0.000432		x 区 0.002~0.02 f 区 $1.0e^{-5}$ ~0.04	
硝酸盐氮	0.000432			x 区 $1.0e^{-5}$ ~ $2.0e^{-4}$ f 区 $1.7e^{-5}$ ~ $3.0e^{-4}$

假定氨氮为线性吸附反应。亚砂土、砾石、种植土的氨氮吸附分配系数通过查阅文献^[6]获取,亚粘土、细砂、粗砂,利用氨氮吸附分配系数计算公式^[7]求得。溶质运移模型上边界选取浓度通量边界,下边界选取零浓度梯度边界,初始条件选取液相浓度边界。

本次模型先运行水流模型 365 天,将水流模型最后时刻的水头作为溶质运移模型的初始水头,之

后运行溶质运移模型的时间为 2000 天。

2.3 包气带底部氮素分布模拟结果

根据模型结果,选取 cBot 最大值作为包气带底部进入含水层污染物浓度进行统计,结果见表 4。由图 2 可知,包气带底部淋滤出水的氨氮浓度高值区集中分布在研究区西北部,硝酸盐氮浓度在整个研究区范围内变化不大。

表4 包气带底部氮素浓度模拟结果

钻孔编号	氨氮	硝酸盐氮	钻孔编号	氨氮	硝酸盐氮	钻孔编号	氨氮	硝酸盐氮
Da211f	0.002	5.729	Da212x	0.013	7.04	Ba121f	0.003	4.603
Bb211f	0.006	5.226	Ea143x	0.024	7.028	Db241f	0.002	5.08
Db211f	0.002	5.703	Cc143x	0.069	6.858	Dc211f	0.003	5.617
Eb211f	0.007	5.829	Ca143x	0.041	6.249	Cc211f	0.017	5.775
Ea211f	0.003	5.578	Db133x	0.112	6.572	Aa112x	0.008	7.555
Ba211f	0.016	5.955	Ab133x	0.046	6.343	Dc113x	0.027	7.115
Dc121f	0.012	4.846	Cb133x	0.025	6.256	Db244x	0.011	5.434
Bb244x	0.014	5.315	Ba244x	0.02	5.31			

3 地下水氮素迁移模拟及贡献率计算

利用 Visual Modflow 进行地下水数值模拟研究,构建地下水氮素迁移转化模型,将上述 Hydrus-1D 模拟结果作为初始输入量,代入模型运算得到研

究区不同污染来源氮素对地下水的输入量。之后结合地下水氮素测试结果,利用均衡公式,分别计算出研究区东南部、西北部的氮污染来源对地下水的贡献率,从而定量描述不同污染来源对地下水污染所

占比例,揭示地下水氮素污染的来源状况。

3.1 地下水流动数值模型

3.1.1 空间与时间离散化

水文地质概念模型范围与实际研究区范围一致,约 6 km×6 km,面积约 36 km²,剖分为 60 行×60 列。模拟期为 2011 年 3 月—2011 年 6 月,共 90 天。

3.1.2 含水层结构特征、边界条件

根据水文地质剖面图,将研究区含水层结构概化为三层,总深度为 60 m,第一层为潜水含水层,主要岩性为粗砂,局部含有砾石;第二层为弱透水层,主要岩性为亚粘土,局部含有粗砂,存在越流现象;第三层为承压含水层,主要岩性为砂砾石,局部含有粗砂。

根据研究区水位观测资料及地下水流场,将研究区东北部和西南部均概化为定流量边界,其中,东北部为地下水径流补给边界,西南部为地下水径流排泄边界;潜水含水层南、北部概化为河流边界。研究区上边界为潜水面,主要接受包气带底部水流入渗补给,且存在蒸发。研究区下边界为承压含水层的底部,概化为隔水边界。

3.1.3 水流场拟合

以 2011 年 3 月地下水流场作为初始流场,运行 90 天后,得到的 2011 年 6 月地下水模拟流场与实际地下水流场进行拟合,见图 3。由图可知,模型地下水流场与实际流场基本吻合,模拟水位与实际水位的水头差小于 0.5 m,符合精度要求,说明该模型符合研究区的水文地质情况,能够真实反映实际地下水流场特征。

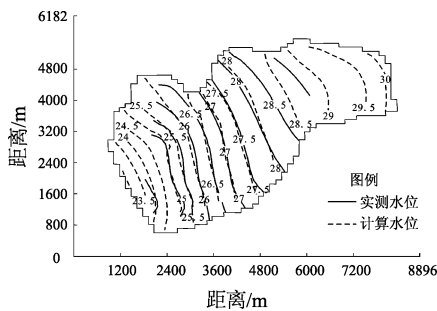


图 3 研究区潜水含水层模拟流场与实际流场拟合

3.2 氮素迁移转化数值模型

利用 RT3D 模块中的连续衰减反应模型,构建研究区氮素迁移转化数值模型,对各源汇项流入、流出地下水系统的氮素质量进行计算,从而得到研究区各污染来源的氮素贡献率。

3.2.1 边界条件及溶质运移参数

研究区浑河和细河均概化为定浓度边界,为更精确地刻画河流对研究区溶质运移模型的作用,根

据野外取样结果,将其分为上、中、下游进行赋值,各段浓度值见表 5。研究区东北部为地下水侧向径流补给边界,概化为定浓度通量边界。研究区上边界为潜水面,接受包气带底部污染物入渗淋滤补给,发生垂向溶质交换量,研究区下部为承压含水层底部,概化为隔水边界,即零通量边界。

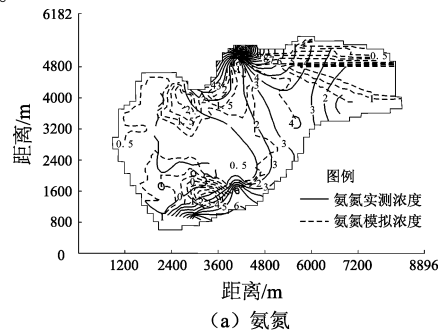
通过查阅文献[5-7]并进行微调,得到氨氮的吸附分配系数 K_d 为 $1.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{g}$,氨氮硝化反应速率常数 K_1 为 0.12,硝酸盐氮反硝化反应速率常数 K_2 为 0.5。依据 Hydrus-1D 模型 23 个子区的包气带底部氮素淋滤出水浓度,对应设定本模型各子区的垂向入渗浓度(见表 5)。

表 5 定浓度边界溶质浓度值 mg/L

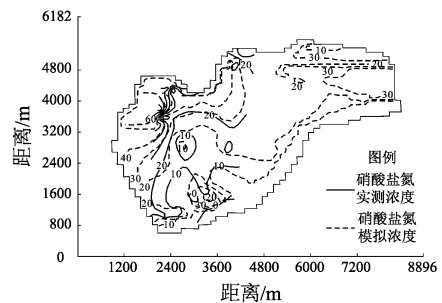
污染源	氨氮	硝酸盐氮
浑河	上游	4.0
	中游	4.0
	下游	2.0
细河	上游	3.0
	中游	2.0
	下游	8.0

3.2.2 氮素浓度场拟合

将 2011 年 3 月的地下水氨氮和硝酸盐氮实测浓度作为模型的初始浓度。溶质运移模型模拟期与水流模型一致(90 天),得到 2011 年 6 月地下水模拟氮素浓度场,与实际地下水氮素浓度场进行拟合,见图 4。



(a) 氨氮



(b) 硝酸盐氮

图 4 研究区潜水含水层氨氮、硝酸盐氮浓度场拟合

模型地下水浓度场与实际浓度场基本吻合,且研究区东南部靠近浑河处,氨氮浓度高,西北部靠近细河处,硝酸盐氮浓度高,模型结果符合现场污染源分布情况,真实反映了研究区的实际地下水氮素浓度分布特征。

3.3 污染贡献率计算

将含水层概化为一个单元体,计算不同污染源对地下水污染的贡献率,见图5。污染源包括:垂向入渗补给、上游补给和河流补给,排泄方式主要为下游排泄,此外,研究区东南、西北部之间存在氮素交换量,由东南部补给西北部。含水层的垂向入渗补给为包气带底部淋滤出水;上游补给为含水层上游补给的地下水;河流补给为浑河补给地下水的水流;下游排泄为包气带水流和地下水的混合水,即为野外采集的地下水。

不同污染源氮素贡献率定义为:在一定时间内,单个污染源氮素补给量占全部污染源氮素

补给量的百分比,计算公式:

$$\text{贡献率} = \frac{Q}{X+Y+Z+p} \times 100\% \quad (3)$$

式中:Q为单个污染源氮素补给量,kg;X为垂向入渗氮素补给量,kg;Y为上游氮素补给量,kg;Z为河流氮素补给量,kg;p为研究区东南、西北部间氮素交换量净补给量,kg。

根据模型运算结果,对模拟数据进行统计、整理,分别得到研究区东南、西北部不同污染源氮素补给量,并由公式(3)计算得氨氮和硝酸盐氮的贡献率,见表6。

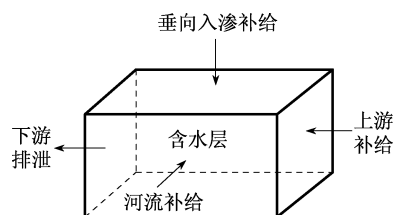


图5 贡献率计算概化模型

表6 研究区东南、西北部不同污染源氮素输入量及贡献率

研究区	源汇项	氨氮		硝酸盐氮	
		补给量/kg	贡献率/%	补给量/kg	贡献率/%
东南部	垂向入渗补给	1.75	0.15	1559.26	44.95
	上游补给	457.7	38.06	1144.26	32.99
	浑河补给	743.13	61.79	765.49	22.07
	小计	1202.58	100	3469.01	100
西北部	垂向入渗补给	10.48	2.48	1974.65	43.92
	上游补给	307.69	72.75	1230.77	27.37
	细河补给	58.08	13.73	70.84	1.58
	南、北部间氮素交换净补给量	46.72	11.05	1220.06	27.13
	小计	422.97	100	4496.32	100

通过分析可知,研究区东南部氨氮污染主要来源于浑河补给,其贡献率高达61.79%;其次为上游侧向补给,其贡献率为38.06%;而垂向入渗补给贡献率极小,贡献率仅为0.15%,分析认为主要是由包气带的还原环境所造成。而硝酸盐氮污染主要来源于垂向入渗补给,其贡献率为44.95%;其次为上游补给,其贡献率为32.99%;浑河补给贡献率较小,为22.07%。

研究区西北部氨氮污染主要来源于上游补给,其贡献率高达72.75%;其次为细河补给,其贡献率为13.73%;同时,西北部接受东南部的氮素侧向净补给量,其贡献率为11.05%;垂向入渗补给贡献率很小,仅为2.48%。这是由于上游补给径流携带着地表垃圾渗滤液、污水坑等污水体,因此西北部氨氮污染主要来源于上游来水。

研究区西北部硝酸盐氮污染主要来源于垂向入渗

补给,其贡献率为43.92%,该值远远大于同源氨氮的贡献率,主要原因为氨氮在包气带迁移中发生了硝化作用,使氨氮含量减少,硝酸盐氮含量增多,这与研究区水化学特征分析结论相同^[8];其次污染源为上游补给和南、北部间交换净补给量,分别为27.37%、27.13%;细河补给贡献率很小,仅为1.58%。

通过地下水氮氧同位素测试分析可知^[9],研究区内地下水中硝酸盐氮主要来源于粪便及污水排放,污染方式主要为垂向入渗;氨氮主要来源于浑河,污染物主要为城市生活污水及工业废水的排放,污染方式主要为河流补给。这也进一步验证了该模型中不同污染源对地下水氮污染贡献率分析的可靠性。

4 结论

1)研究区地下水氮污染整体特征为东南部氨氮浓度较高,自上游向下浓度呈升高趋势;西北部硝酸

盐氮浓度较高,地下水超标较少。

2)研究区东南、西北部地下水氮污染存在不同的污染来源,东南部地下水氨氮的主要污染来源为浑河补给和上游补给,贡献率分别为 61.79%、38.06%;西北部地下水硝酸盐氮的主要污染来源为垂向入渗和上游补给,贡献率分别为 43.92%、27.37%。

参 考 文 献

- [1] 郑艳侠,冯绍元,姜娜,等.北京市北运河流域农业非点源污染类型及贡献率分析[J].中国农村水利水电,2010(8):30-33.
- [2] 李玮,何江涛,刘丽雅,等. Hydrus-1D 软件在地下水污染风险评估中的应用[J].中国环境科学,2013,33(4):639-647.
- [3] Tillotson, W. R., Robbins, C. W., Wagenet, R. J., Hanks, R. J. Soil Water, Solute and Plant Growth Simulation, Bulletin, 502. Utah Agricultural Experiment Station, 1980, 55pp.
- [4] 唐大雄,刘佑荣,张文殊,等.工程岩土学(第二版)[M].北京:地质出版社,1999.
- [5] 马军花,任理.考虑水力学和矿化参数空间变异下

土壤水氮运移的数值分析[J].水利学报,2005,36(9):1067-1076.

- [6] Osvaldo Salazar, Ingrid Wesström, Mohamed A. Youssef, et al. Evaluation of the DRAINMOD-N II model for predicting nitrogen losses in a loamy sand under cultivation in south-east Sweden[J]. Agricultural Water Management 96(2009):267-281.
- [7] Knisel, W. G., Leonard, R. A., Davis, F. M. The GLEAMS model plant nutrient component. In: Knisel, W. G. (Ed.), GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems. UGA-CPES-BAED Publication no. 5 Coastal Plain Exp. Stn., Biol. And Agric. Eng. Dep. University of Georgia, Tifton, 1993:2-49.
- [8] 沈杨,何江涛,王俊杰,等.基于多元统计方法的地下水水化学特征分析:以沈阳市李官堡傍河水源地为例[J].现代地质,2013,27(2):440-447.
- [9] 王俊杰.沈阳浑河傍河区域地下水氮素污染研究[D].北京:中国地质大学(北京),2013.

收稿日期:2015-01-19

(上接第 58 页)

4 结 语

本文结合实际工程,利用 AutoCAD 软件中的 AutoLISP 编程方法开发出了一套工程数据处理程序。

该程序实现了对离散点数据的插值、三维网格重构和实体模型的生成,并将之应用于实际工程,为工程数据的插值和推演、三维实体重构以及土方量的计算提供了一条便捷之路。

该程序的使用不仅有利于设计人员对工程计算结果的判断和利用,而且有利于设计人员对设计作出及时地调整,从而达到优化工程设计、减少工程费用的目的。

此外,采用本文提出的方法编制的程序具有移植性强、操作方便直观、适用范围广、计算精度高等特点;能大大减轻工程人员的工作强度,提高工作效率,具有重要的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 李殷,朱益虎. DTM 在土方计算中的应用,地矿测绘[J]. 2006,22(4):33-36.

- [2] 慕永峰,朱昌勇,李建.三角网结构 DTM 的土方计算及应用[J].测绘工程,2000,9(1):52-56.
- [3] 纪凯.基于 AutoCADVBA 的公路施工横断面图的绘制和土方量计算[J].城市勘测,2010(4):133-136.
- [4] 李春梅,景海涛.基于 ArcGIS 的土方量计算及可视化[J].测绘科学,2010,35(2):186-187.
- [5] 周诚,程建川.基于数模的土方计算系统开发[J].交通与计算机,2006(3):57-63.
- [6] 陈道洁,付守默. AutoLISP 及应用开发技术[M].成都:成都科技大学出版社,1997.
- [7] 武晓波,王世新,肖春生. Delaunay 三角网的生成算法研究[J].测绘学报,1999,28(1):28-35.
- [8] 良泽圣.清华大学学术专著——三维数据场可视化[M].北京:清华大学出版社,1999.
- [9] 徐旭,李源,陈学工.一种基于插入法的 Delaunay 三角网生成算法[J].电脑与信息技术,2010,18(4):29-44.
- [10] 苏茜,张丽群. AutoCAD LISP_VLISP 函数库查询辞典[M].北京:中国铁道出版社,2001.

收稿日期:2014-12-02