

浅埋隧道下穿高压给水管道微振动控制研究

王晓鹏¹, 王海亮²

(1. 中铁九局集团有限公司, 辽宁 沈阳 110000;

2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

摘要:为减小区间隧道爆破作业对地下高压给水管道的扰动,需对其进行微振动控制。针对青岛地铁某区间隧道下穿 DN1200 高压给水管道,最近距离仅为 8.9 m、围岩 IV~V 级的特点,结合爆破施工经验,进行了微振动爆破控制专项设计。通过选用大直径中空孔直眼掏槽、合理选择爆破参数,对爆破振动进行有效控制。同时,对爆破振动进行动态监测,分析爆破振动影响。结果表明:在进尺为 750 mm 时,选用 150 mm 直径中空孔,环形布置掏槽眼,分炮次起爆的情况下,可将振速控制在 1 cm/s 以下,达到良好的减振效果,为类似工程提供了参考。

关键词:爆破;直眼掏槽;微振动控制;高压管道;近距离

中图分类号: TB41

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)03-0061-06

Study on Micro-vibration Blasting Control for Shallow Tunnel Crossing Underneath High Pressure Water Supply Pipelines

WANG Xiaopeng¹, WANG Hailiang²

(1. China Railway No. 9 Group Co. Ltd, Shenyang, Liaoning 110000, China

2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In order to reduce the disturbance of tunnel blasting to the underground high pressure water supply pipelines, it is necessary to carry out micro-vibration blasting control. Based on the tunnel of Qingdao metro crossing underneath high pressure water supply pipeline DN1200 with the nearest distance of only 8.9 m and the surrounding rock of grade IV ~ V and combined with blasting construction experience, a special design of micro-vibration blasting control was carried out. The blasting vibration was effectively controlled by selecting the large diameter empty hole and blasting parameters reasonably. At the same time, dynamic monitoring of blasting vibration was conducted and the effect of blasting vibration was analyzed. The results show that with a footage rate of 750 mm, 150 mm diameter empty hole, annular arrangement of cut holes and sub shot blasting, the vibration velocity can be controlled within 1 cm/s and good damping effect can be achieved, which provides a reference for similar projects.

Key words: blasting; parallel cut; micro-vibration control; high pressure pipeline; near distance

在城市轨道交通工程中,因隧道与地下管线交叉重叠,不可避免要考虑其施工对市政管网的影响。若隧道工程措施不当,极易造成管线开裂,诱发煤气泄漏、水患、停电、通讯中断等安全事故,造成不必要的经济损失及社会影响^[1]。隧道近距离下穿管线是浅埋暗挖施工的主要难题和风险之一,越来越受到重视。

收稿日期: 2016-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(10672091)

作者简介: 王晓鹏(1980—),男,辽宁抚顺人,主要从事地铁隧道工程等方面的研究工作. E-mail: xwldzs_1456@163.com

王海亮(1963—),男,河北石家庄人,教授,博士生导师,主要从事工程爆破、地下工程、安全评价理论等方面的研究,本文通信作者. E-mail: tlgcbp@263.net

国内外学者已对隧道穿越管线控制措施做了相关研究;李军省^[2]利用 Midas GTS 软件及现场监测数据,分析了隧道施工对管线的影响,确定了包括注浆加固、分台阶控制爆破等下穿给水管线的技术措施;杨选择等^[3]针对隧道穿越有压管道情况,上半断面帷幕注浆,对富水砂层进行止水加固,并提出短进尺、弱爆破、加强超前支护的技术措施,顺利通过管道;王凯^[4]通过现场监控量测、数值模拟等分析了钻爆法施工对邻近腐蚀管线的影响,并提出优化的爆破参数及安全防护控制措施;Anirban 等^[5]针对地表爆破情况,开展了管线、隧洞等地下结构物离心模型试验。

上述研究中,针对穿越大直径高压给水管道的爆破微振动控制研究较少。青岛地铁 3 号线某区间隧道上方管线对爆破振动速度控制要求为在 1.0 cm/s 范围内。根据前期非下穿管路段爆破施工经验,通过振动验算可知,下穿段若继续采用原爆破方案,不能满足振动控制要求,需进行专项设计,实现微振动控制。本研究主要结合现场工程实际,提出大直径中空孔直眼掏槽分部起爆微振动控制技术,从爆破开挖角度减少对有压给水管线的影响。

1 工程概况及风险分析

青岛地铁岭清暗挖隧道施工地层主要为第四系(Q),围岩等级为 IV~V,从地表起依次有素填土、强风化岩层、中风化岩层、微风化岩层,为上软下硬地层。工作区内的地下水类型主要为第四系松散堆积层孔隙水及基岩裂隙水,地下水补给来源主要为大气降水和河流上游的侧向径流补给。

如图 1 所示,该区间隧道下穿引黄入青的 DN1200 高压给水管。管道直径达 1 200 mm,与隧道最近距离仅为 8.9 m。同时, DN1200 给水管线与隧道走向一致,埋深为 2.8 m,为混凝土承插式接头,水泥胶圈接口,脆性较大,水管下方无支撑墩,建设施工过程中多次爆破的振动累积可能导致该管线损坏。

一方面,爆破振动会影响围岩的稳定,当爆破振动较大时,将会破坏围岩的完整性,诱发地层沉降,导致管线的破坏;另一方面,管内为高压给水、管线管径较大、无支撑墩,管线易于损坏且破坏后易发生水患。因此,控制爆破振动,减少区间隧道施工对管线及围岩影响,成为重点关注的难题。

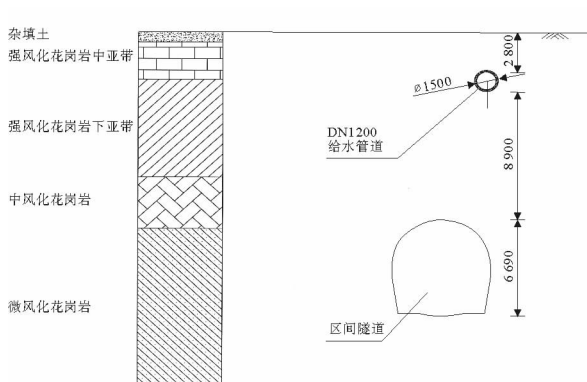


图 1 DN1200 高压供水管线与暗挖隧道的位置关系
Fig. 1 Position relationship between high pressure water supply pipeline DN1200 and metro built by mining method

2 波传播机理及微振动控制技术

隧道掌子面爆破近区(即爆源区域)产生冲击波,爆破中区产生应力波,通过岩土介质进行传播,最终转换为相应的初级及次级地震波,对建(构)筑物造成一定的有害效应^[6]。爆破波的传播形式如图 2 所示。在工程实践中,因岩土介质的不均匀及不连续性,相应波动也较为复杂。根据爆破的特点,现阶段爆破微振动控制措施主要从爆源、受保护构筑物及传播过程三方面进行^[7],施工中前两者较多。

2.1 爆源振动控制

在爆源、传播过程、受保护构筑物三方面振动控制中,针对爆源采取振动控制研究方法较多,应用也较为广泛。从爆源振动控制角度分析,包含了炸药的选取、药量的控制、爆破时差的选择、钻爆参数的制定等。

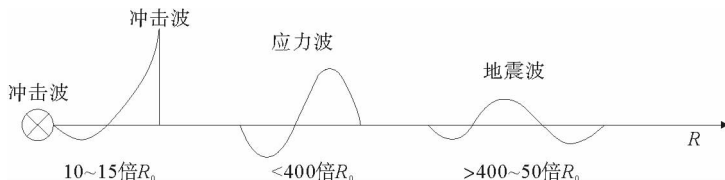


图 2 波的传播形式(R_0 为装药半径)

Fig. 2 The spread of the wave form(R_0 for charge column)

炸药爆速与质点的振动速度密切相关,呈现正比关系。为降低爆破振动影响,应尽量采用低爆速的炸药。在青岛爆破工程中常用的炸药有乳化炸药及水胶炸药两种。2 号岩石乳化炸药爆速趋近于 3 200 m/s,

可有效减少因炸药爆速对质点振动速度的影响。表 1 为 2 号岩石乳化炸药的主要指标。

表 1 2 号岩石乳化炸药性能指标
Tab. 1 The performance indicators of 2 Rock Emulsion Explosive

项目	密度/(g/cm ³)	猛度/mm	爆速/(m/s)	爆力/mL	殉爆/cm	使用保证期/d
性能指标	0.95~1.30	≥12	≥3 200	≥260	≥3	180

爆破引起的质点振动速度的衰减规律一般用萨道夫斯基经验公式表示。根据式(1)可知,单段起爆药量 Q 越大,质点振动速度 V 也随之增大。在地质条件一定的情况下,为了降低爆破振动对地表建筑物的影响,较为有效的方式就是限制单段最大起爆药量。因此,爆破中应降低同段段起爆的雷管数目及单孔装药量。

$$V = K \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: V 是保护对象的质点振动速度,cm/s; Q 是最大单段炸药量,kg; R 是爆源与保护对象质点间的最短距离,m; K 、 α 分别是与地质条件等相关的系数和衰减指数。

理想状况下,若微差爆破时间选择合理,则可以使得几个爆源在某个时刻实现波的反向叠加,即所谓的波峰和波峰相互叠加,降低波的振幅,实现爆破振动强度的削弱,避免受保护物的共振现象。一般而言,爆破时差 Δt 越大,减振效果越好。同时,考虑到振动持续时间因素,爆破的时差不宜取过大。根据相关研究,微差时间在 50~200 ms 范围内时,爆破震动效应可得到有效控制。

钻爆参数的制定包含了掏槽形式的选择、减排距及孔深的确定等。隧道爆破中,掏槽主要以楔形掏槽及直眼掏槽两种形式为主。直眼掏槽需在爆破前钻取中空孔增加自由面,使得爆炸能量得到有效释放,减少爆破振动向周围岩体的传播。炮孔间排距及孔深制定上,应遵循“多打眼、短进尺”的原则。

2.2 传播过程控制

爆破传播过程中,若作为传播介质的围岩整体性好,爆破振动衰减较慢;当围岩自身整体性不好或人为破坏后,爆破振动衰减速率随之增加。所以改变传播过程条件可降低爆破振动的影响。现阶段,主要应用的技术手段包括了预裂爆破、隧道周边静态破碎、开挖隔振沟槽等方法。以预裂爆破及静态破碎为例,爆破时钻孔的数目增多,增加了施工作业时间及药剂成本,在本研究中未采用此种振动控制方式。

3 爆破参数设计

本区间隧道分上下台阶施工,上台阶超前下台阶 5 m。因上台阶紧靠管道且没有良好的自由面,为本次研究的重点控制对象。隧道上台阶开挖面积 15.08 m²,循环进尺取 0.75 m,采用大直径中空孔直眼掏槽爆破技术。上台阶炮眼共计 89 个,比钻眼数 7.36 个/m²,炸药总药量 16.3 kg,单耗为 1.44 kg/m³。爆破共分 3 次,按照顺序 I、II、III 依次起爆。图 3 为隧道上台阶炮眼布置图,图中阿拉伯数字表示雷管段别,罗马数字表示开挖炮次。

3.1 掏槽眼参数的确定

为充分利用辅助自由面及良好的空孔效应,采用的中空孔直径越大,掏槽效果愈好。根据现有的设备条件,中空孔孔径选择 150 mm 的大孔径。为提高施工效率及保证中空孔位置的准确性,水平布置的中空孔一次钻凿深度 7~10 m。掏槽眼以中空孔为中心,四个掏槽眼及四个扩槽眼环形分布。

首响孔与中空孔距离决定着掏槽效果及爆破振动控制,其决定因素是药包爆炸能量能否有效破碎岩体、掏槽爆落区体积是否大于胀碎后的体积等因素。按照爆破作用指数理论,空孔与首响孔间距

$$a = R \left(\frac{1}{n} + 1 \right) \quad (2)$$

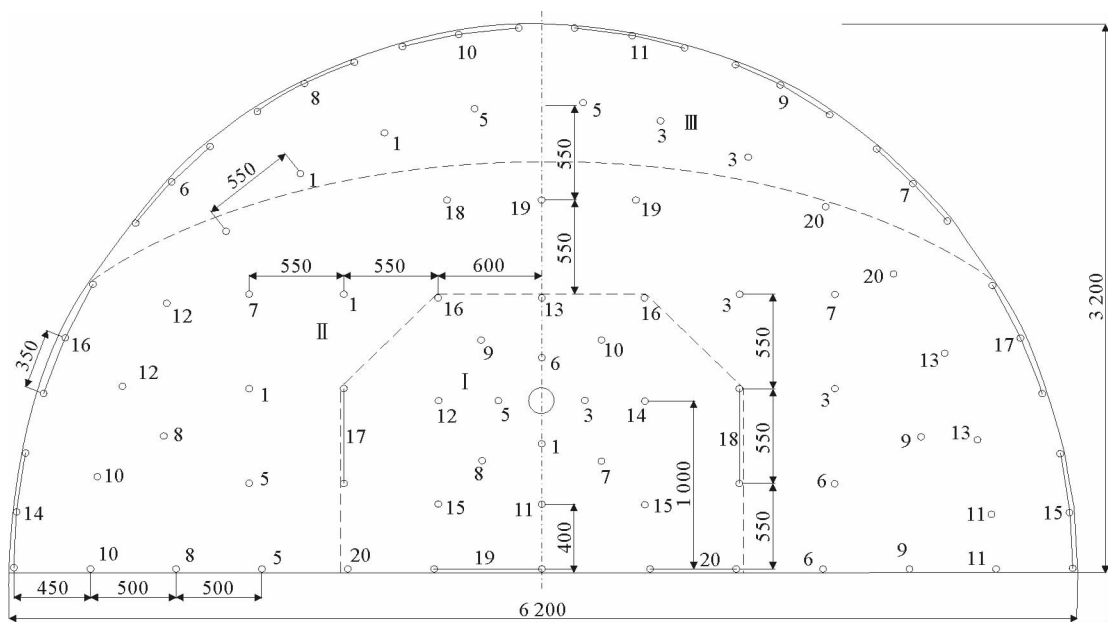


图 3 上台阶炮眼布置图

Fig. 3 The drawing for blast-hole arrangement of upper bench

式中: a 为首角孔与大直径空孔距离; R 为空孔半径; n 为爆炸作用指数, 取值范围 $0.1 \sim 0.75$, 当空孔半径较小时 n 取小值^[8]。当 R 取 75 mm 时, n 取 0.42 。计算得最内侧掏槽眼距中空孔 250 mm , 掏槽眼间距向外逐步扩大^[9], 见图 4。

掏槽眼炮孔孔深与循环进尺成正比关系。根据工程经验, 循环进尺 750 mm , 掏槽眼孔深取 900 mm 。通过萨道夫斯基公式可知, 单段最大起爆药量越大, 其相应的振动影响也越明显。为减少对地面的扰动、同时达到良好的掏槽效果, 掏槽单孔装药量取 0.2 kg , 单孔单响, 即单段最大起爆药量为 0.2 kg 。

3.2 周边眼参数

周边眼决定着隧道的成型效果。周边眼应沿开挖轮廓线布设, 孔底位于同一平面上, 同时保持有 $3\% \sim 5\%$ 的外插斜率。隧道上台阶主要处于中风化岩层中, 围岩相对较软, 参考表 2 炮眼间距 E 取 350 mm 。当周边眼密集系数 K (炮眼间距 E 与光爆层厚度 W 的比值) 接近 0.8 时, 可达到良好的光面爆破效果, 故 W 取 450 mm 。

表 2 光面爆破参考数值

Tab. 2 Referential data for smooth Blasting

岩石类别	炮眼间距 E/cm	抵抗线 W/cm	密集系数 K	装药集中度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$
硬岩	55~70	60~80	0.7~1.0	0.30~0.35
中硬岩	45~65	60~80	0.7~1.0	0.20~0.30
软岩	35~50	40~60	0.5~0.8	0.07~0.12

本设计中, 根据炮眼间距 E 、光爆层厚度 W 等参数, 确定周边眼的单孔装药量。由于隧道上台阶周边的围岩相对较软, 装药集中度取 0.15 kg/m , 则 0.8 m 的炮孔长度单孔装药量为 0.12 kg 。

3.3 辅助眼参数

直线形与弧线形是辅助眼的两种基本布置方式, 本方案将两种方式充分结合。辅助眼间距 a 、排距 b 应

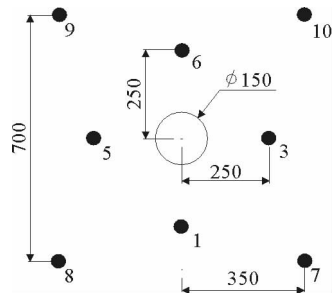


图 4 掏槽眼布置示意图

Fig. 4 The schematic diagram of cutting hole

大于周边眼的最小抵抗线 W , 而且 a 、 b 的取值与炮眼的单孔装药量有关。本设计取 $a=500\sim 600$ mm, $b=500\sim 600$ mm。辅助眼的单孔装药量与炮眼的间排距及围岩硬度等紧密相关。循环进尺为 0.75 m, 取炮孔深度 0.8 m, 单孔装药量 0.15 kg。

4 振动控制与分析

为最大限度的监控隧道爆破对管线的振动影响, 监测仪器均布置于爆破掌子面上方、给水管线轴线对应的地表位置, 同时采集管线上方在垂直方向、水平轴向及水平切向三个方向的振动数据。所监测的数据与地下管线振动相应速度有所不同, 但在工程实践中, 因爆破监测条件限制, 默认地表监测数据作为管线振速。爆破地震波特性和参数包含了振幅、频率及持续时间^[10-11]。现阶段, 爆破振动广泛依据振动速度进行判断。

为有效证明方案的控制效果, 对连续 20 个开挖循环炮次的 3 个方向峰值振动速度进行了统计, 如表 3 所示。前 20 个开挖循环炮次的实测结果表明, 最大振速出现在第 6 炮, 振速 0.917 cm/s, 未发生超振。实测结果表明, 全部振动速度均控制在 1.0 cm/s, 爆破的振动速度集中控制在 0.25~0.75 cm/s, 爆破振动控制效果良好。垂直方向平均最大振动速度为 0.484 cm/s, 水平轴向平均振动速度为 0.356 cm/s, 水平切向平均速度为 0.346 cm/s, 进一步说明采取大直径空孔直眼掏槽、严格控制单段最大药量微振动控制措施的可行性。

表 3 开挖循环与各方向的振速峰值

Tab. 3 The excavation cycle and every direction of peak vibration velocity

循环 炮次	振动速度及主频					
	最大垂直分量		最大切向分量		最大轴向分量	
	v_1 /(cm/s)	f_1 /Hz	v_3 /(cm/s)	f_3 /Hz	v_2 /(cm/s)	f_2 /Hz
1	0.760	37.040	0.526	27.400	0.578	29.410
2	0.633	28.780	0.274	26.490	0.634	59.700
3	0.458	50.000	0.269	29.200	0.157	48.190
4	0.471	48.780	0.590	28.990	0.440	35.710
5	0.749	61.540	0.641	75.470	0.390	52.630
6	0.917	59.700	0.759	52.630	0.710	44.440
7	0.162	51.280	0.090	68.970	0.210	54.050
8	0.351	52.630	0.180	52.630	0.190	50.000
9	0.432	52.630	0.210	52.630	0.220	50.000
10	0.191	57.970	0.140	42.110	0.160	54.790
11	0.243	44.440	0.290	44.440	0.260	44.940
12	0.311	48.190	0.250	48.190	0.230	48.190
13	0.340	49.380	0.230	25.970	0.130	54.790
14	0.764	40.820	0.490	25.480	0.500	20.100
15	0.651	45.450	0.560	25.470	0.700	43.960
16	0.450	45.450	0.430	25.470	0.610	43.960
17	0.441	37.740	0.450	24.840	0.140	24.390
18	0.524	32.260	0.530	37.380	0.220	27.970
19	0.103	40.400	0.120	42.110	0.500	34.780
20	0.751	36.360	0.100	40.000	0.180	31.500

5 结论与建议

结合下穿高压给水管线隧道开挖施工对爆破振动的控制要求,通过爆破的微振动控制,提出可行的掏槽形式、控制炮孔的单孔装药量及单段最大药量、选择合理的间排距、分炮次开挖等一系列措施,并根据监控量测数据,得出主要结论如下:

1)采用 150 mm 大直径中空孔,掏槽孔及扩槽眼均采用单孔单响,首响孔与中空孔中心距离 250 mm,可满足掏槽处微振动控制的要求,可将掏槽处振速控制在 1.0 cm/s 范围内。

2)辅助眼孔深 0.8 m,辅助眼单孔装药量 0.15 kg,间排距 500~600 mm,可实现良好的爆破效果且满足微振动控制要求。

3)分炮次爆破可以保证形成良好自由面,规避大段别延期起爆复杂网路易出现的残管风险,有效控制振动速度。

本研究将设计与现场试验结合,实现了微振动控制的目标,针对下穿高压管线采用的爆破控制方法具有一定的实施性和指导意义。但是,微振动控制举措较多,针对受保护构筑物微振动控制措施还应进一步研究。同时,将地表监测数据作为管线振动速度的研究尚需探讨。

参考文献:

- [1]刘学通.爆破振动下埋地天然气管道的动力响应研究[D].成都:西南交通大学,2015:1-2.
- [2]李军省.地铁暗挖出入口下穿地下管线保护措施及计算分析[J].石家庄铁道学院学报(自然科学版),2013,26(1):151-161.
LI Junsheng. Underground subway entrances to wear under the underground pipeline protection measures and calculation analysis[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science),2013,26(1):151-161.
- [3]杨选择,赵耀.地铁隧道浅埋下穿富水砂层密集有压管线施工技术[J].云南科技管理,2013(5):50-54.
YANG Xuanze,ZHAO Yao. Subway tunnel shallow buried in rich water sand intensive pressure pipeline construction technology[J]. Yunnan Science and Technology Management,2013(5):50-54.
- [4]王凯.滨海地区钻爆法施工对邻近腐蚀管线的影响及风险评估分析[D].大连:大连理工大学,2013:36-82.
- [5]ANIRBAN D,ZIMMIE T F. Centrifuge modeling of surface blast effects on underground structures[J]. Geotechnical Testing Journal,2007,30(5):428-431.
- [6]沈秀峰.地铁爆破施工对地表建筑物的微振动影响分析[D].大连:大连交通大学,2012:13-15.
- [7]周宜,王海亮,张祖远,等.城市浅埋隧道下穿建筑物的微振动爆破技术研究[J].隧道建设,2015,35(1):89-93.
ZHOU Yi,WANG Hailiang,ZHANG Zuyuan,et al. Study on micro-vibration blasting technology for shallow tunnels crossing underneath existing buildings in urban area[J]. Tunnel Construction,2015,35(1):89-93.
- [8]唐信来,黎剑华,杨伟忠,等.岩石工程大空孔螺旋掏槽爆破机理研究及应用[J].南昌工程学院学报,2005,24(4):12-15.
TANG Xinlai,LI Jianhua,YANG Weizhong,et al. Study on blasting mechanism and its engineering use of spiral cutting with big empty hole in rock under-excavation[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology,2005,24(4):12-15.
- [9]张祖远,王海亮.大直径中空孔直眼掏槽微振动爆破参数研究[J].隧道建设,2015,35(2):174-179.
ZHANG Zuyuan,WANG Hailiang. Study on micro-vibration blasting parameters of large-diameter empty-hole parallel cut [J]. Tunnel Construction,2015,35(2):174-179.
- [10]王海亮,张亮,张祖远.城市隧道爆破震动影响因素的重要度研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2016,35(2):73-78.
WANG Hailiang,ZHANG Liang,ZHANG Zuyuan. Importance degree of factors influencing tunnel blasting vibration[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2016,35(2):73-78.
- [11]陈士海,张安康,张子华,等.爆破地震作用下结构的损伤及动力响应分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2011,30(5):36-41.
CHEN Shihai,ZHANG Ankang,ZHANG Zihua,et al. Damage of structures and dynamic response analysis under the action of blasting seism[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2011,30(5):36-41.